

**Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation**  
Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education  
«**NATIONAL RESEARCH**  
**TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY**»

---

School of Nuclear Science & Engineering  
Field of training (specialty): 14.03.02 Nuclear Science and Technology  
Nuclear Fuel Cycle Division

**BACHELOR THESIS**

Topic of research of work
<b>Calculation of absorbed dose in ion exchange resin for the separation of Lutetium-177 from Ytterbium using the GEANT4 software package</b>

UDC 661.183.1:621.039.59:004.41

Student

Group	Full name	Signature	Date
0A92	Chertkov Mikhail Sergeevich		

Scientific supervisor

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor of DNFC	Timchenko S.N.	PhD		

**ADVISERS:**

Section «Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving»

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor of DSHS	Gasanov M.A.	Grand PhD in Economics		

Section «Social Responsibility»

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor of DNFC	Perederin Y.V.	PhD		

**ADMITTED TO DEFENSE:**

Programme Director	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Senior lecturer	Selivanikova O.V.	-		

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

---

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Расчет поглощённой дозы в ионообменной смоле при разделении Лютеция-177 от Иттербия с использованием программного комплекса GEANT4</b>

УДК 661.183.1:621.039.59:004.41

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A92	Чертков Михаил Сергеевич		

Руководитель ВКР

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

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов М.А.	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
14.03.02. Ядерные физика и технологии	Селиванникова О.В.	-		

Томск – 2023 г.

## MAIN CURRICULUM LEARNING OUTCOMES

Competency code	Learning outcomes (competencies)
<b>Transferrable competencies</b>	
TC(U)-1	Able to search, critically analyze and synthesize information, apply a systematic approach to solve tasks
TC(U)-2	Able to determine the range of tasks within the goal and choose the best ways to solve them, based on current legal regulations, available resources and restrictions
TC(U)-3	Able to carry out social interaction and realize any role in the team
TC(U)-4	Able to carry out business communication in oral and written forms in the state language of the Russian Federation and foreign language(s)
TC(U)-5	Able to perceive the intercultural diversity of society in the socio-historical, ethical and philosophical contexts
TC(U)-6	Able to manage the time, build and implement the trajectory of self-development based on the principles of education throughout life
TC(U)-7	Able to maintain the proper level of physical fitness to ensure social and professional activities
TC(U)-8	Able to create and maintain safe living conditions, including in case of emergencies
TC(U)-9	Able to show entrepreneurship in professional activities, including as part of the development of a commercially promising product based on a scientific and technical idea
<b>General professional competencies</b>	
GPC(U)-1	Able to use basic knowledge of natural sciences in professional activities, apply methods of mathematical analysis and modeling, theoretical and experimental research
GPC(U)-2	Able to search, store, process and analyze information from various sources and databases, provide it in the required format using information, computer and network technologies
GPC(U)-3	Able to use modern information systems in professional activities, analyze the dangers and threats arising from this, comply with the basic requirements of information security, including the protection of state secrets
<b>Professional competencies</b>	
PC(U)-1	Able to use scientific and technical information, domestic and foreign experience on research topics, modern computer technologies and information resources
PC(U)-2	Able to carry out mathematical modeling of processes and objects of the nuclear industry using standard methods and computer codes for design and analysis
PC(U)-3	Ready for conducting physical experiments according to a given methodology, making a description of ongoing research and analyzing the obtained experimental data
PC(U)-4	Able to use technical means to measure the main parameters of research objects
PC(U)-5	Ready to draw up a report on the completed task, to participate in the implementation of research and development results
PC(U)-6	Able to use information technology in the development of new installations, materials and devices, to collect and analyze initial data for the design of nuclear industry facilities

PC(U)-7	Able to calculate and design parts and assemblies of devices and installations in accordance with the terms of reference
PC(U)-8	Ready for the development of design and working technical documentation, registration of completed design work
PC(U)-9	Capable of monitoring the compliance of developed projects and technical documentation with standards, specifications, safety requirements and other regulatory documents
PC(U)-10	Ready to conduct a preliminary feasibility study of design solutions for the development of installations and devices
PC(U)-11	Capable of monitoring compliance with technological discipline and maintenance of technological equipment
PC(U)-12	Ready for operation of modern physical equipment, instruments and technologies
PC(U)-13	Able to assess nuclear and radiation safety, to assess the impact on the environment, to monitor compliance with environmental safety, safety regulations, norms and rules of industrial sanitation, fire, radiation and nuclear safety, labor protection standards
PC(U)-14	Ready to develop ways to use nuclear power, plasma, laser, microwave and high-power pulse installations, electron, neutron and proton beams, methods of experimental physics in solving technical, technological and medical problems
PC(U)-15	Able to draw up technical documentation (work schedules, instructions, plans, estimates, applications for materials, equipment), as well as established reporting in approved forms

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
<b>Универсальные</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
<b>Общепрофессиональные</b>	
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
<b>Профессиональные</b>	
ПК(У)-1	Способен использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы
ПК(У)-2	Способен проводить математическое моделирование процессов и объектов атомной отрасли с использованием стандартных методов и компьютерных кодов для проектирования и анализа

ПК(У)-3	Готов к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу полученных экспериментальных данных
ПК(У)-4	Способен использовать технические средства для измерения основных параметров объектов исследования
ПК(У)-5	Готов к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок
ПК(У)-6	Способен использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу исходных данных для проектирования объектов атомной отрасли
ПК(У)-7	Способен к расчету и проектированию деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием
ПК(У)-8	Готов к разработке проектной и рабочей технической документации, оформлению законченных проектно-конструкторских работ
ПК(У)-9	Способен к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам
ПК(У)-10	Готов к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных решений при разработке установок и приборов
ПК(У)-11	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования
ПК(У)-12	Готов к эксплуатации современного физического оборудования, приборов и технологий
ПК(У)-13	Способен к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда
ПК(У)-14	Готов разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, сверхвысокочастотных и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем
ПК(У)-15	Способен к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам

**Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation**  
 Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education  
 «NATIONAL RESEARCH  
 TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY»

School of Nuclear Science & Engineering  
 Field of training (specialty): 14.03.02 Nuclear Science and Technology  
 Nuclear Fuel Cycle Division

APPROVED BY:  
 Program Director  
 \_\_\_\_\_ Selivanikova O.V.  
 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023

**ASSIGNMENT  
 for the Graduation Thesis completion**

In the form:

Bachelor Thesis
-----------------

For a student:

Group	Full name
0A92	Chertkov Mikhail Sergeevich

Topic of research of work:

Calculation of absorbed dose in ion exchange resin for the separation of Lutetium-177 from Ytterbium using the GEANT4 software package	
Approved by the order of the Director of School of Nuclear Science & Engineering (date, number):	01.02.2023 г., № 32-52/с

Deadline for completion of Bachelor Thesis:	
---	--

**TERMS OF REFERENCE:**

<b>Initial data</b>	Experimental data of absorbed dose rate measurement. Physical and chemical characteristics of ion exchange resin KU-2-8.
<b>List of the issues to be investigated, designed and developed</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Development of a program in GEANT4 software package for modelling the radiation field of irradiated ion-exchange resin.</li> <li>2. Results of simulation of absorbed dose rate from distance, in-plane and panel distribution.</li> </ol>
<b>Advisors to the sections of the Bachelor Thesis</b>	
<b>Section</b>	<b>Advisor</b>
Calculating section	Associate Professor of DNFC S.N. Timchenko
Experimental section	Associate Professor of DNFC S.N. Timchenko
Financial management, resource efficiency and energy conservation	Professor of DSHS M.A. Gasanov
Social Responsibility	Associate Professor of DNFC Y.V. Perederin

**Date of issuance of the assignment for Bachelor Thesis completion according to the schedule**

01.02.2023

**Assignment issued by a scientific supervisor**

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor of DNFC	Timchenko S.N.	PhD		01.02.2023

**Assignment accepted by a student**

Група	Full name	Signature	Date
0A92	Chertkov Mikhail Sergeevich		01.02.2023

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) – 14.03.02 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Селиванникова О.В.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

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

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0A92	Черткову Михаилу Сергеевичу

Тема работы:

Расчет поглощённой дозы в ионообменной смоле при разделении Лютеция-177 от Иттербия с использованием программного комплекса GEANT4	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№32-52/с от 01.02.2023

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Экспериментальные данные измерения мощности поглощенной дозы. Физико-химические характеристики ионообменной смолы КУ-2-8.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Разработка программы в программном комплексе GEANT4 для моделирования поля излучения облученной ионообменной смолы.</li> <li>2. Результаты моделирования мощности поглощенной дозы от расстояния, распределение в плоскости и панели.</li> </ol>
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Расчетная часть	Доцент ОЯТЦ ИЯТШ С.Н. Тимченко
Экспериментальная часть	Доцент ОЯТЦ ИЯТШ С.Н. Тимченко
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Профессор ОСГН М.А. Гасанов

Социальная ответственность	Доцент ОЯТЦ ИЯТШ Ю.В. Передерин
-------------------------------	---------------------------------

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	01.02.2023
---	------------

**Задание выдал руководитель**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко Сергей Николаевич	к.т.н.		01.02.2023

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А92	Чертков Михаил Сергеевич		01.02.2023

**Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation**  
**Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education**  
**«NATIONAL RESEARCH**  
**TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY»**

School of Nuclear Science & Engineering  
 Field of training (specialty): 14.03.02 Nuclear Science and Technology  
 Nuclear Fuel Cycle Division

**SCHEDULED ASSESSMENT CALENDAR**  
**for the Bachelor Thesis completion**

For a student:

Group	Full name
0A92	Chertkov Mikhail Sergeevich

Topic of research of work:

Calculation of absorbed dose in ion exchange resin for the separation of Lutetium-177 from Ytterbium using the GEANT4 software package

Deadline for completion of Bachelor Thesis:	
---	--

Assessment date	Title of section (module) / type of work (research)	Максимальный балл раздела (модуля)
<i>03.02.2023</i>	<i>Setting goals and objectives</i>	<i>10</i>
<i>16.02.2023</i>	<i>Drafting and approval of TT</i>	<i>10</i>
<i>16.03.2023</i>	<i>Selection and study of materials on the subject</i>	<i>15</i>
<i>16.04.2023</i>	<i>Development of the calendar plan</i>	<i>15</i>
<i>30.04.2023</i>	<i>Literature discussion</i>	<i>20</i>
<i>14.05.2023</i>	<i>Program development</i>	<i>20</i>
<i>28.05.2023</i>	<i>Registration of a settlement and explanatory note</i>	<i>10</i>

**COMPILED BY:**

**Scientific supervisor:**

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor of DNFC	Timchenko S.N.	PhD		

**COMPILED BY:**

**Program Director:**

Programme Director	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Senior lecturer	Selivanikova O.V.	-		

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки – 14.03.02 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Студенту:

Группа	ФИО
0А92	Черткову Михаилу Сергеевичу

Тема работы:

Расчет поглощённой дозы в ионообменной смоле при разделении Лютеция-177 от Иттербия с использованием программного комплекса GEANT4

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Maximum score for the section (module)
03.02.2023	<i>Постановка цели и задач</i>	10
16.02.2023	<i>Составление и утверждение ТЗ</i>	10
16.03.2023	<i>Подбор и изучение материалов по тематике</i>	15
16.04.2023	<i>Разработка календарного плана</i>	15
30.04.2023	<i>Обсуждение литературы</i>	20
14.05.2023	<i>Разработка программы</i>	20
28.05.2023	<i>Оформление расчетно-пояснительной записки</i>	10

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	К.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОЯТЦ	Селиванникова О.В.	-		

## **Abstract**

Final qualifying work contains 83 pages, 18 figures, 29 tables, 33 sources of literature, 1 applications.

Key words: reactor irradiation, lutetium-177, ion-exchange chromatography, radionuclide separation, Geant4.

The object of the study is a model of chromatographic column with ion-exchange resin KU-2-8, the subject of the study is physical, chemical and radiation properties of the ion-exchange resin.

Purpose of the work is to determine the absorbed radiation dose and radiation resistance of cation exchange resin when separating lutetium and ytterbium isotopes.

In the course of the study, a programme for calculating the absorbed dose rate at cation exchange resin when separating lutetium and ytterbium isotopes. Models of a chromatographic column filled with ion-exchanger and a radiation source were constructed. It is shown that the obtained gamma- and beta-radiation spectra of lutetium-177 are in good agreement with the known experimental spectra. It is shown that when the eluent passes along the resin, the distribution of the absorbed dose rate along the length of the chromatographic column agrees with the experimental data and corresponds to the values of about 4540 Gy/Hr.

## Contents

Introduction .....	16
1 Literature review .....	17
1.1 The ways of obtaining $^{177}\text{Lu}$ .....	17
1.2 Method for ion exchange chromatographic separation of lutetium and ytterbium .....	20
1.3 GEANT4 software package .....	21
2 Simulation .....	25
2.1 The physics of the model .....	25
2.2 Creating a model .....	27
2.3 Creating a radiation source .....	32
2.4 Calculation of deposited energy.....	36
3 Results of simulations of absorbed radiation dose.....	39
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 43	
4.1 Потенциальные потребители .....	44
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	45
4.1.2 SWOT-анализ .....	46
4.2 Планирование научно-исследовательской работы.....	49
4.2.1 Структура работы в рамках научного исследования.....	49
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения .....	50
4.3 Бюджет научно-технического исследования .....	54
4.3.1 Расчёт материальных затрат научно-технического исследования ...	54
4.3.2 Основная заработная плата исполнителей .....	55
4.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды .....	57
4.3.4 Накладные расходы.....	58
4.3.5 Формирование бюджета затрат проекта.....	59
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования..	59
4.4.1 Оценка научно-технического эффекта .....	59
4.4.2 Оценка сравнительной эффективности исследования.....	62

4.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» .....	64
5 Социальная ответственность .....	66
5.1 Введение.....	66
5.2 Компоновка исследовательской рабочей зоны.....	67
5.3 Вредные и опасные факторы рабочей зоны .....	67
5.4 Микроклимат .....	68
5.5 Уровень шума.....	69
5.6 Освещенность.....	70
5.7 Электробезопасность.....	72
5.8 Взрывопожароопасность.....	73
5.9 Радиационная безопасность.....	74
5.10 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях.....	74
5.11 Выводы по разделу «Социальная ответственность».....	75
Conclusions .....	77
List of sources used.....	78
Appendix A .....	83

## Introduction

Lutetium-177 (Lu-177) is among the most promising radionuclides serving as the basis for the production of innovative radiopharmaceuticals. The possibility of using  $^{177}\text{Lu}$  in almost all classes of compounds used in radionuclide therapy is currently being studied. So far, only one drug ( $^{177}\text{Lu}$ -DOTA-TATE) has been approved for clinical use, and laboratory studies are ongoing for a further 19 drugs.

For lutetium production, ion exchange chromatography is one of the methods used for the radiochemical processing of irradiated targets. The ion exchange resin involved in the separation of radioactive isotopes is exposed to radiation. As a result of this exposure, various physical and chemical processes take place on the ion exchange resin material, leading to a deterioration of its performance parameters over time. To assess the life of the cation exchange resin without loss of properties, computer simulation with the calculation of the absorbed radiation dose is carried out.

The purpose of this bachelor's thesis is to determine the absorbed radiation dose and radiation resistance of cationic exchange resins when separating lutetium and ytterbium isotopes.

The following objectives are set in order to achieve the goal:

1. Construction of a chromatographic column model;
2. Creation of an emission source;
3. Calculation modelling of energy deposition in cationite;
4. Conducting a comparative analysis.

# 1 Literature review

## 1.1 The ways of obtaining $^{177}\text{Lu}$

Commonly known ways to produce lutetium-177 isotope include irradiation with neutrons of nuclear reactor  $^{176}\text{Lu}$  by reaction  $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)^{177}\text{Lu}$  ("direct" way) or  $^{176}\text{Yb}$  by reaction  $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}(\beta^-)^{177}\text{Lu}$  ("indirect" way). Figure 1 shows a schematic of the  $^{177}\text{Lu}$  accumulation chains.

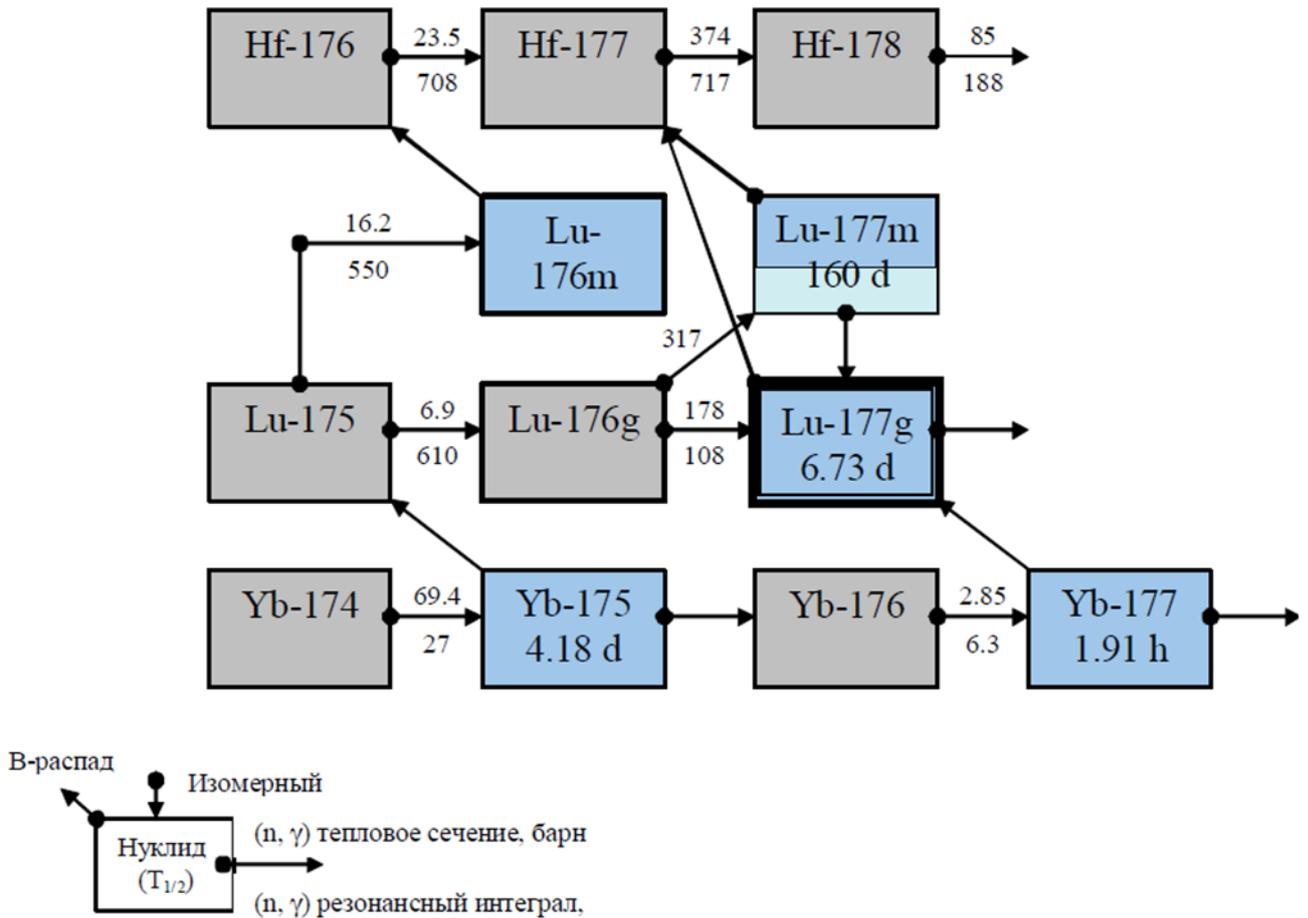


Figure 1.1 – The scheme of the accumulation chains  $^{177}\text{Lu}$

The  $^{176}\text{Lu}$  nucleus has a high [1] value of the thermal and resonance neutron capture cross-section, which leads to a rapid achievement of a relatively high  $^{177}\text{Lu}$  specific activity. However, as a result of the intensive burnup of starter material nuclei in the irradiation process, the values of specific activity and yield (maximum activity) of the reaction product do not coincide. Thus, a specific activity of 45000 Ci/g can be achieved in medium-flow reactors and a specific activity of  $\sim 76000$  Ci/g

can be achieved in high-flow reactors; it is approximately 70% of the theoretical  $^{177}\text{Lu}$  specific activity ( $\sim 110000\text{ Ci/g}$ ). At present this value is the limit for obtaining lutetium-177 by "direct" method.

In addition to target  $^{177}\text{Lu}$  the long lived metastable radionuclide  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  ( $T_{1/2} = 160,4$  days) is formed in the target which is undesirable from the medical point of view [2] as well as from the point of view of radiation protection and stable hafnium isotopes. In order to reduce the radiation load on the patient and to reduce the activity of waste generated in clinics during "lutetium" therapy, the content of  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  in the final product is limited. The presence of the resulting hafnium does not hinder the subsequent synthesis of lutetium-based radiopharmaceuticals, since Hf does not form the corresponding complex compounds [3].

During implementation of  $^{177}\text{Lu}$  obtaining from  $^{176}\text{Yb}$  only one lutetium isotope is formed, so the product with theoretical specific activity ( $\sim 110000\text{ Ci/g}$ ) can be obtained. The yield of  $^{177}\text{Lu}$  strongly depends on neutron flux density and increases monotonically up to the maximum value. For a duration of irradiation in a high-flux reactor with thermal neutron flux density of  $2 \cdot 10^{15}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  exceeding 40 days, the yield is  $\sim 520\text{ Ci/g}$ . For medium-flux reactors the yield is considerably less and does not exceed  $110\text{-}115\text{ Ci/g}$  with a neutron flux density of  $5 \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and irradiation duration of 20 days [4].

Low values of cross-sections of the main producing reactions of the nuclear transmutation chain during irradiation of  $^{176}\text{Yb}$  make it possible to neglect the factor of self-absorption of neutrons. An undoubted advantage of this method of producing  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  is an extremely low yield of  $^{177\text{m}}\text{Lu}$ . Unlike "direct" method of  $^{177}\text{Lu}$  accumulation, burnout of lutetium nuclei is almost absent, which leads to a considerable decrease of Hf isotope amount even during irradiation in high-flux reactor.

A significant influence on the specific activity of  $^{177}\text{Lu}$  obtained by "indirect" method has an isotopic composition of starter material. Commercially available oxide  $^{176}\text{Yb}$  may contain up to 2-3% of isotope  $^{174}\text{Yb}$ . The presence of this isotope in the starter composition leads to the accumulation of  $^{175}\text{Yb}$  ( $T_{1/2} = 4,18$  days),

which decays into  $^{175}\text{Lu}$  both during and after the irradiation and, thus, reduces the specific activity of  $^{177}\text{Lu}$  accumulated during the irradiation. The presence of the  $^{174}\text{Yb}$  impurity in the starter material effectively eliminates a major advantage of the "indirect"  $^{177}\text{Lu}$  production method. The solution to this problem is to minimize the accumulation of  $^{175}\text{Lu}$  by reducing the time between the end of irradiation and the reprocessing of the irradiated material. This is possible if the radiochemical production is located at a small distance from the irradiation site to minimize the transport time of the irradiated target to the reprocessing site.

Thus, it is possible to identify the key problems affecting the efficiency of the implementation of the considered  $^{177}\text{Lu}$  production schemes:

Highly enriched  $^{176}\text{Lu}$  and a high-flux reactor are needed for efficient implementation of the scheme  $^{176}\text{Lu} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ . In addition, the problem of long-lived  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  requires a separate study (e.g., determining the minimum acceptable fraction that does not affect the consumer properties of the resulting  $^{177}\text{Lu}$  preparation);

The effective implementation of the scheme  $^{176}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$  requires a starter ytterbium with a minimum content of  $^{174}\text{Yb}$ . The  $^{177}\text{Lu}$  producer implementing the scheme  $^{176}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$  must have a rapid radiochemical procedure to separate lutetium from ytterbium.

In addition to the traditional reactor-based method of lutetium-177 production, a relatively new accelerator-based method of lutetium-177 production has been developed [5] in which  $\text{HfO}_2$  targets are irradiated by shaving photons. Developed method of  $^{177}\text{Lu}$  production ensures high degree of purification of the isotope from radioactive impurities of hafnium, zirconium and yttrium and does not require any carrier;  $^{177\text{m}}\text{Lu}/^{177}\text{Lu}$  activity ratio reaches the value  $(2,87 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$ , which means high degree of product purity. The value is  $(2,87 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$  which means high degree of product purity. Due to high chemical and radionuclide purity,  $^{177}\text{Lu}$  obtained by the developed method can be used in nuclear medicine. The irradiated  $\text{HfO}_2$  can be quantitatively regenerated and reused for the production of  $^{177}\text{Lu}$  medical isotopes.

## **1.2 Method for ion exchange chromatographic separation of lutetium and ytterbium**

Chromatography is a physical and chemical technique used to separate substances based on the distribution of components between two phases, the mobile phase and the stationary phase. The stationary phase is usually a solid (sorbent) or a liquid film deposited on a solid. The mobile phase is a liquid or gas flowing through the stationary phase.

Chromatography can be used to separate complex mixtures of organic and inorganic substances into their individual components, purify substances from impurities, concentrate substances from highly concentrated dilute solutions, perform qualitative and quantitative analysis of substances of interest, etc.

Ion exchange chromatography is based on the reversible stoichiometric exchange of ions in a chromatographic solution with ions of a substance called an ion exchanger or ion exchanger. Ion exchangers can be organic or inorganic, natural or synthetic.

Ion-exchange chromatography makes use of the difference in ion-exchange equilibrium constants between ions in solution and the ion-exchange phase. Ion exchange chromatography techniques are effective from macroscopic to microscopic quantities and are at the forefront of modern research in solving problems associated with the separation of substances. Due to the simplicity of the process, the easy regeneration of the ion exchanger and the ability to operate remotely, these methods are highly efficient for the separation of highly specific radionuclides, closely related ions and heavy fission products. In these processes the columns are equipped with ion exchange resins as stationary phases. The cation exchanger is used for cation separation and the anion exchanger is used for anion separation. Separation in an ion exchange resin column is carried out using pre-precipitation, displacement and elution methods.

Among the methods used for radiochemical separations, ion exchange chromatography is the most reliable and simplest method for separating micro and

macro components. However, although ion exchange chromatography methods are attractive in terms of ease of use, some target substance and target radionuclide pairs are difficult to separate directly due to their similar chemical properties [5].

For example, Yb and Lu are adsorbed on the cation exchanger and can be eluted with the corresponding complexing agent, so there is such a pair. Two equilibria have to be considered: between the complexer and the ion exchanger and between Yb and Lu and the complexer; the difference in the stability constants of Yb and Lu for the complexer determines the distribution coefficient. However, even when the  $\alpha$ -hydroxyisobutyrate ( $\alpha$ -HIBA) complex, suitable for the separation of Lu and Yb, is used as eluent, the distribution ratio of Lu and Yb is only 1.55 [6], which is not sufficient for deep product separation.

Due to the low separation factor, the lutetium fraction contains significant amounts of ytterbium through 'peak tailing'. Furthermore, the  $\alpha$ -HIBA  $^{177}\text{Lu}$  complex is not suitable for  $^{177}\text{Lu}$ -labeled RFP synthesis; to enable the use of  $^{177}\text{Lu}$  for RFP synthesis,  $\alpha$ -HIBA must be degraded and removed due to its high stability constant. The separation of  $^{177}\text{Lu}$  from the very stable  $^{177}\text{Lu}$ - $\alpha$ -HIBA species is essential, since the presence of  $\alpha$ -HIBA not only reduces the yield of the synthetic product, but also requires additional purification. In order to overcome this drawback, one of the methods used to remove  $\alpha$ -HIBA is adsorption on cationic stones and elution with 9 M HCl [7].

Although chromatography is generally not considered suitable for the separation of Lu and Yb because of the large amount of radioactive waste produced and the relatively long recovery time of the target material, many researchers have successfully used this method.

### **1.3 GEANT4 software package**

GEANT4 is a set of libraries and classes that can be used to accurately simulate the passage of particles through matter. At the core of Geant4 is a rich set of physical models for handling particle-matter interactions over a very wide range of energies. The data and experience have come from many sources around the world,

and in this respect Geant4 acts as a repository that includes much of what is known about particle interactions.

The GEANT4 toolkit uses a combination of Monte Carlo composition and rejection methods. A Monte Carlo method can be defined as a method for modelling random variables in order to calculate the characteristics of their distributions. The Monte Carlo method models random variables with known distribution functions (cross sections) as a function of energy, angles, quantum numbers, particles involved in the interaction; these are then combined into more complex variables whose distribution functions are difficult or impossible to find using direct analytical methods. The resulting distributions can be accurately known, in which case the apparatus of mathematical statistics is used to estimate them.

The Monte Carlo method can play an important role in proton and ion applications. Algorithms currently used to estimate absorbed dose in proton therapy rely on the parameterisation of an empirically determined proton dose distribution, which is limited by the approximations and simplifications used in these models. The Monte Carlo method can provide an accurate estimate of absorbed dose, taking into account all physical processes including energy loss during electromagnetic interaction, random energy scattering, multiple Coulomb scattering, elastic and inelastic nuclear interactions, and secondary particle transport.

Particle transfer in GEANT4 is the result of the GEANT4 kernel step manager class combined with the processes caused by its behaviour (physical processes, transport "processes" that determine the geometric volume behind the track when it reaches the next volume boundary). The expected duration of the interaction is determined by interrogating all the processes applied at each step. It is then determined whether the particle stays in the current volume long enough before this potential interaction occurs, or whether it moves to another volume.

The most important processes for determining the trajectory of a charged particle, including boundary crossings and the effects of external fields, are the multiple scattering and transport processes.

In GEANT4 the simulation of particle transport is performed in steps. The actual step length for the next physical interaction is randomly chosen using the average free interaction path or different step limits determined by the different GEANT4 components. The minimum step limit determines the new actual step length. The calculation of the mean free path of a particle in the medium is done in GEANT4 using the cross section and atomic density for the physical process in question. For simple materials the number of atoms in the volume is given as follows

$$n = \frac{\rho N}{A} \quad (1.1)$$

where:

$\rho$  – density of the medium;

$N$  – Avogadro's number;

$A$  – mass of a mole.

In a compound material the number of atoms per volume of the  $i$  element is:

$$n_i = \frac{\rho N w_i}{A_i} \quad (1.2)$$

where:

$w_i$  – proportion by mass of the  $i$  element;

$A_i$  – mass of a mole of the  $i$  element;

The mean free path of a process,  $\lambda$ , also called the interaction length, can be given in terms of the total cross section:

$$\lambda(E) = \left( \sum_i [n_i \cdot \sigma(Z_i, E)] \right)^{-1} \quad (1.3)$$

where  $\sigma(Z, E)$  is the total cross section per atom of the process and  $\sum_i$  runs over all elements composing the material.  $\sum_i [n_i \cdot \sigma(Z_i, E)]$  is also called the macroscopic cross section. The mean free path is the inverse of the macroscopic cross section.

The transport process is responsible for determining the geometric boundaries of the steps. When a track moves to another volume, it calculates the length of the step. When the track reaches the boundary, the transport process determines the next volume the track enters. If particles are charged and an

electromagnetic field (or potentially another field) is present, the electromagnetic field is responsible for propagating the particles within that field. This happens according to the equations of motion. In the case of magnetic and electromagnetic fields this equation is provided by GEANT4, while other fields can be provided by the user.

$$\frac{dp}{ds} = \frac{1}{v} F = \frac{q}{v} (E + v \cdot B) \quad (1.4)$$

## 2 Simulation

### 2.1 The physics of the model

When modelling in GEANT4, it is important to consider all possible processes. As mentioned above, the decay of a lutetium-177 nucleus produces gamma rays, electrons and electron antineutrinos.

The following processes are modelled for gamma rays:

- photoelectric effect;
- Compton effect.

And for the interaction processes of electrons with matter are modelled:

- Coulomb scattering;
- ionization;
- bremsstrahlung radiation.

For processes: photoelectric effect and bremsstrahlung radiation, the interaction cross section is determined by interpolation according to formula (2.1) [15]:

$$\log(\sigma(E)) = \frac{\log(\sigma_1) \log(E_2/E) + \log(\sigma_2) \log(E/E_1)}{\log(E_2/E_1)} \quad (2.1)$$

where:

$E$  – particle energy;

$E_1, E_2$  – the nearest lower and higher energy values for which the values are known  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$ .

For the Compton effect with a gamma-quantum energy less than 5 MeV, the analytical formula (2.2) [15] is used:

$$\sigma(E) = 2\pi \int_{-1}^1 \frac{r_e^2 E_c^2}{2 E^2} \left( \frac{E_c}{E} + \frac{E}{E_c} - \sin^2 \theta \right) \cdot \sum_{shells} f_i \Xi(E - U_i) n_i(p_z^{max}) d(\cos \theta) \quad (2.2)$$

where:

$r_e$  – classical electron radius;

$m_e$  – electron mass;

$\theta$  – scattering angle;

$E_c$  – Compton energy;

$f_i$  – the number of electrons in the  $i$ -th atomic shell;

$U_i$  – ionization energy on the  $i$ -th atomic shell;

$\Theta$  – heaviside step function;

$p_z$  – projection of the initial electron momentum in the direction of the scattering angle;

$p_z^{max}$  – maximum possible value  $p_z$ .

Data [16] are used for the photoelectric effect, for the formation of electron-positron pairs [17] and bremsstrahlung radiation [18].

In GEANT4, the physics in the model can be specified in three main ways using: reference, modular and user physics lists. The Physics List is one of the three mandatory user classes of the GEANT4 toolkit. In this class all GEANT4 particles and their interaction processes should be instantiated. The main advantage of working with the reference Physics List is in common method of instantiation of physics objects in GEANT4 tests, in GEANT4 examples, and in user applications. Number of reference Physics Lists is not small, because there are many alternative physics models in the toolkit applicable for simulation of very different problems. The reference list is enabled by connecting the library corresponding to the physical list and registering it strictly before the GEANT4 kernel is initialized. Each reference list consists of basic physical modules. There are following types of modules:

- electromagnetic physics;
- extra physics processes for gamma and leptons;
- decay;
- hadron elastic;
- hadron inelastic;
- stopping particles capture processes;
- ion nuclear interactions;
- step limiters;
- others.

In essence, a modular physical list is very similar to a reference list. The difference lies in the implementation of creating this list. While the reference list is a list with a ready-made list of physical modules, the modular list is self-assembled by the user from ready-made physical interaction modules.

The most complete control over the physics of the simulated world can be obtained by creating a custom physics list, using the `G4VUserPhysicsList` descendant class. It differs from the modular one in having mandatory methods: method for creating particles (`ConstructParticle()`) and method for creating processes (`ConstructProcess()`). The user is responsible for a complete description of all processes and particles required for modelling. The processes themselves are constructed on the basis of the available library elements.

The work used a custom physics sheet to specify the physics of the simulation. In accordance with the aforementioned processes, the necessary processes of interaction of electrons and gamma-quanta with matter were specified in the program code. An excerpt of the code is shown in figure 2.1.

```
// register
//
G4PhysicsListHelper* ph = G4PhysicsListHelper::GetPhysicsListHelper();
ph->RegisterProcess(radioactiveDecay, G4GenericIon::GenericIon());

ph->RegisterProcess(new G4ComptonScattering, G4Gamma::Gamma());
ph->RegisterProcess(new G4PhotoElectricEffect, G4Gamma::Gamma());

ph->RegisterProcess(new G4CoulombScattering, G4Electron::Electron());
ph->RegisterProcess(new G4eIonisation, G4Electron::Electron());
ph->RegisterProcess(new G4eBremsstrahlung, G4Electron::Electron());
```

Figure 2.1 – Particle-matter interaction processes used in modelling

## 2.2 Creating a model

Chromatographic methods are used for the industrial and experimental analysis of multi-component mixtures. One of the most important elements of analysis is the chromatographic column, which is used to separate complex substances into their constituent components. The use of high quality columns

ensures high accuracy, protects the substances from cross-contamination and reduces the mobile phase consumption.

Chromatography columns are tubes filled with a stationary phase. The mixture to be analysed flows through the device on a liquid or gaseous carrier. Based on the different adsorption and desorption capacities of the chemical elements there is a temporary bonding between the material components and the sorbent. This leads to a gradual separation of the sample compounds.

Chromatographic columns can be metallic or glass columns. Glass chromatography columns are versatile, can be used for a wide range of chromatographic methods, and are compatible with most modern chromatographs through adapters. An example of a column is shown in figure 2.2.

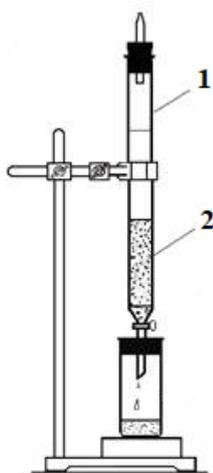


Figure 2.2 – The scheme of the of a chromatography column.

1 – glass column, 2 – adsorbent

A model of a chromatography column has been reconstructed in the GEANT4 software package. It consists of a coupling tripod, a chromatography column, an ion exchange resin, and a water solution with a uniformly distributed radioactive source. The materials for the tripod (steel) and column (glass) are specified from the NIST GEANT4 library. The model is shown in Figure 2.3.

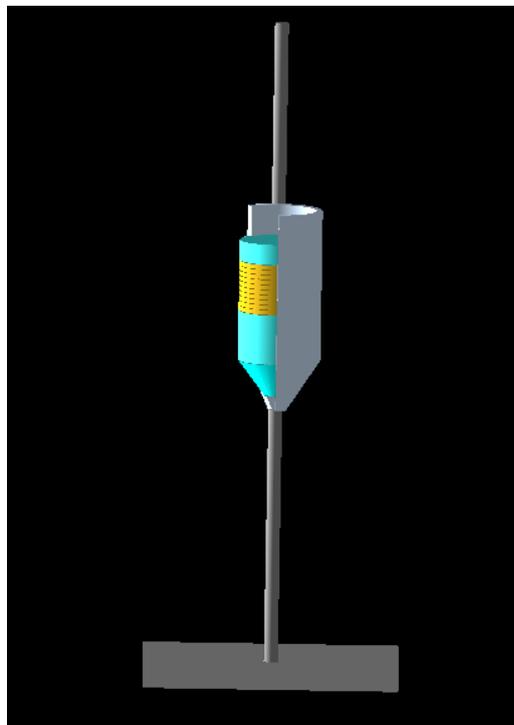


Figure 2.3 – Chromatography column model built in GEANT4

The sorbent used is an ion exchange resin KU-2-8. The cation exchange resin KU-2-8 is a multifunctional silicate acid resin. The main feature of the cation exchanger is the presence of acidic groups that can exchange hydrogen with metal ions present in solution. Its main properties are characterized by stability to osmotic pressure changes, high resistance to chemical and physical influences, high resistance to abrasion of granules to oxidizing agents, alkalis and thermal influences. This resin is an insoluble cross-linked copolymer obtained by joint polymerisation of styrene and the cross-linking agent divinylbenzene. The molecular formula of the framework is shown in figure 2.4.

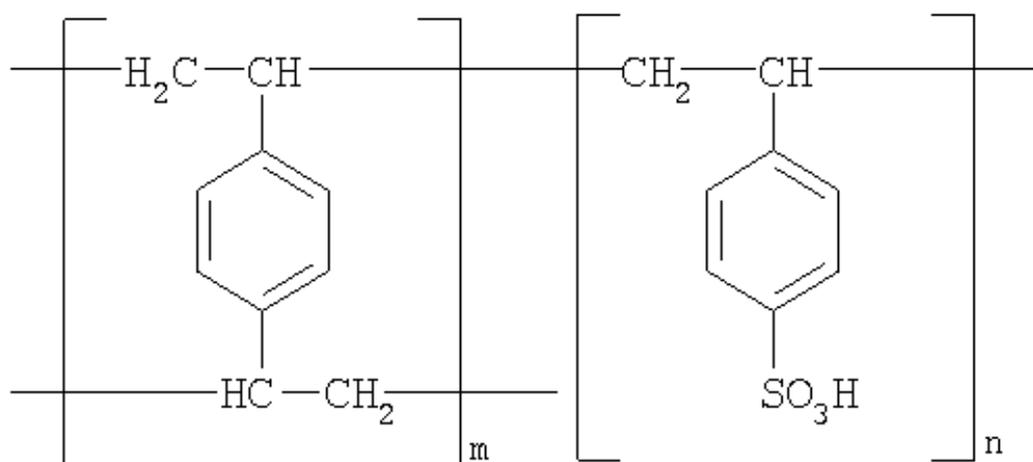


Figure 2.4 – General view of the unit cell of the strongly acidic cationic exchange resin KU-2-8 [8]

The granules of the cation exchange resin KU-2-8 are non-washable and insoluble in solution or water. They swell when immersed in water. Externally it resembles spherical yellowish grains of 0,315-1,250 mm in size. Table 2.1 shows the basic physico-chemical properties of cationic exchange resins KU-2-8 [8, 9].

Table 2.1 – Physical and chemical characteristics of ion exchange resin KU-2-8

Indicator name	Standard
Effective grit size, mm	0,40-0,55
Working fraction, %	96
Uniformity coefficient	1,7
Osmotic stability, %	94,5
Mass fraction of moisture, %	43-53
Total static exchange capacity, mmol/cm <sup>3</sup> (mg-eq/cm <sup>3</sup> )	1,9

In the built model the cationite has orange colouring and represents a cylinder 10 equal layers in height of 10 mm and diameter of 15 mm. This is done in order to measure the absorbed dose along the length of the column as the eluent passes through the resin. Figure 2.5 shows in detail the layers of ion exchange resin (one of which is illuminated) inside the column.

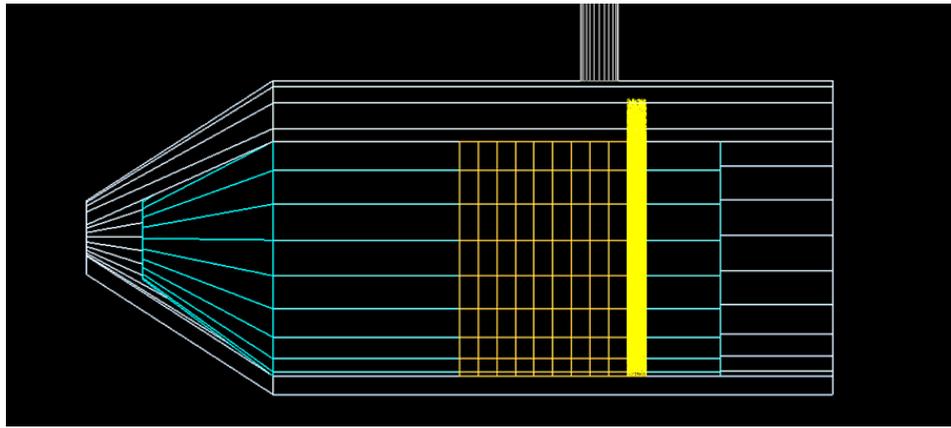


Figure 2.5 – Ion exchange resin

A detector geometry in GEANT4 is made of a number of volumes. Each GEANT4 geometry element is defined by three objects:

1. The concept of a solid is used to describe the geometric properties of an object. This is a specific object of a particular shape and size, such as a sphere (G4Sphere) or a pipe (G4Tubes).

2. A logical volume (G4LogicalVolume) is used to describe all the properties of a volume. This volume includes the geometric properties of the solid along with additional physical properties (e.g. material of the volume, presence or absence of sensitive sensing elements, magnetic field, etc.).

3. The location of the object in space is important. To do this you create a physical volume (G4PVPlacement), which places a copy of the logical volume inside a larger, containing, volume.

All objects created in the programme are necessarily inside the largest (World) volume. It is also shaped, most often a cube, composed of some material and has an arrangement.

Three main classes have been developed in GEANT4 to describe the composition of matter: material (G4Material), element (G4Element) and isotope (G4Isotope). Each of these classes has a table as a static data member to keep track of the instances of the corresponding class created; the three objects are automatically saved in the corresponding table after creation and should never be deleted by user code. As the name suggests, the G4Isotope class describes the

properties of atoms: atomic number, number of nucleons, etc. The class `G4Element` describes the properties of elements: effective atomic number, effective number of nucleons, effective mass per mole, number of isotopes, and quantities like cross section per atom, etc. The class `G4Material` describes the macroscopic properties of matter: density, state, temperature, pressure, and macroscopic quantities like radiation length, mean free path, etc.

### 2.3 Creating a radiation source

The source of radiation in the present work is lutetium-177. Lutetium-177 decays to the stable ground state  $^{177}\text{Hf}$  with a half-life of 6.65 days in 76% of events ( $E_{\beta(\text{max})} = 0.497 \text{ MeV}$ ) and decays to  $^{177}\text{Hf}$  in 9.7% of events ( $E_{\beta(\text{max})} = 0.384 \text{ MeV}$ ). In 12% of events ( $E_{\beta(\text{max})} = 0.176 \text{ MeV}$ ) it enters the excited state  $^{177}\text{Hf}$  at 0.24967 MeV and 0.32132 MeV above the ground state and enters the ground state by emitting photons. During these radioactive decays  $^{177}\text{Lu}$  emits beta particles with  $E_{\beta(\text{max})}$  497 keV (78.6%), 384 keV (9.1%) and 176 keV (12.2%) and low energy  $\gamma$  photons [ $E_{\gamma} = 113 \text{ keV}$  (6.6%) and 208 keV (11%)]. A simplified scheme of  $^{177}\text{Lu}$  decay is shown in figure 2.6 [10, 11].

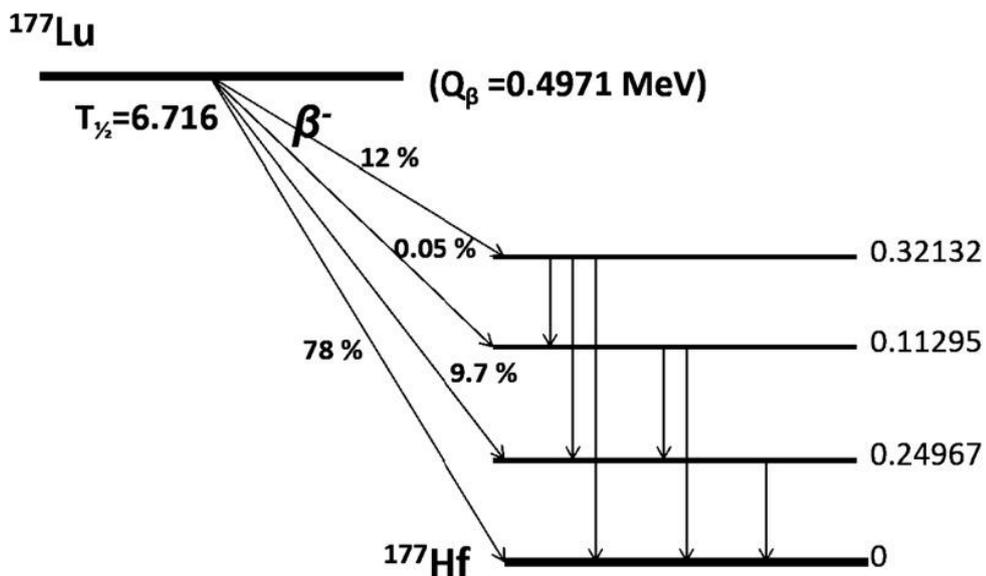


Figure 2.6 – Simplified decay scheme of  $^{177}\text{Lu}$  [10]

There are two main ways to define a primary radiation source in GEANT4: creating derived classes such as `G4ParticleGun` and `G4GeneralParticleSource`. The

first one allows user to set all parameters of a radiation source (particle type, energy, spatial distribution, etc.) by himself using programming capabilities. The second one allows to create the radiation source with parameters, which are set in the files of executable scripts.

In this work application of G4ParticleGun method as a source of radioactive isotope  $^{177}\text{Lu}$  is realized. Figure 2.7 shows an excerpt of the source code.

```
// The volumetric source
static constexpr double pi = 3.14159265358979323846;
static constexpr double twopi = 2 * pi;
G4double phi = twopi * G4UniformRand();
G4double l = 1.5 * G4UniformRand();
G4double x = l * cos(phi);
G4double y = l * sin(phi);
G4double z = 0.9 + 0.1 * (2 * G4UniformRand() - 1);
G4ThreeVector pos(x * cm, y * cm, z * cm);
G4ThreeVector mom(0., 0., 1.);

fParticleGun->SetParticlePosition(pos);
fParticleGun->SetParticleMomentumDirection(mom);

G4ParticleDefinition* particle = fParticleGun->GetParticleDefinition();

if (particle == G4Geantino::Geantino())
{
    // Lutetium-177
    G4int Z = 71;
    G4int A = 177;

    G4double charge = 0. * eplus;
    G4double energy = 0. * keV;

    G4ParticleDefinition* ion = G4IonTable::GetIonTable()->GetIon(Z, A, energy);
    fParticleGun->SetParticleDefinition(ion);
    fParticleGun->SetParticleCharge(charge);
}
fParticleGun->GeneratePrimaryVertex(anEvent);
```

Figure 2.7 – Setting the radiation source

The SetParticleDefinition() method specifies the type of particles. Thus, based on the known values of the number of protons and nucleons in the nucleus, lutetium-177 was specified as the source particle. The SetParticlePosition() and SetParticleMomentumDirection() methods are needed to specify source coordinates and particle flight direction. As you can see from the code, the source is specified over the entire volume of a particular ion exchange resin layer. In the case of decay, the propagation vector can be any value, as it has no effect on decay. The particles

are launched by executing `GeneratePrimaryVertex()` method, the argument of which is a pointer to the object of `G4Event` class.

A comparative analysis of the theoretical and modelled energy spectra of gamma and beta emissions of lutetium-177 was carried out to assess source quality. Figures 2.8 and 2.9 show the theoretical spectra of  $\gamma$ - and  $\beta$ -emissions of  $^{177}\text{Lu}$ .

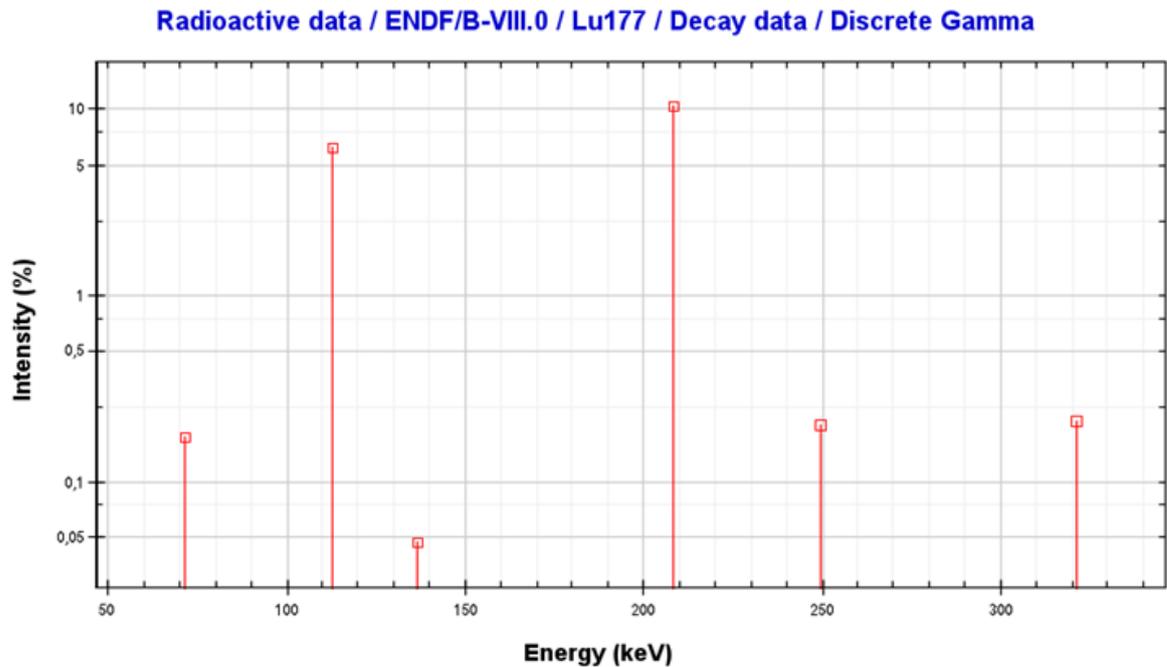


Figure 2.8 – Theoretical energy spectrum of gamma radiation of lutetium-177

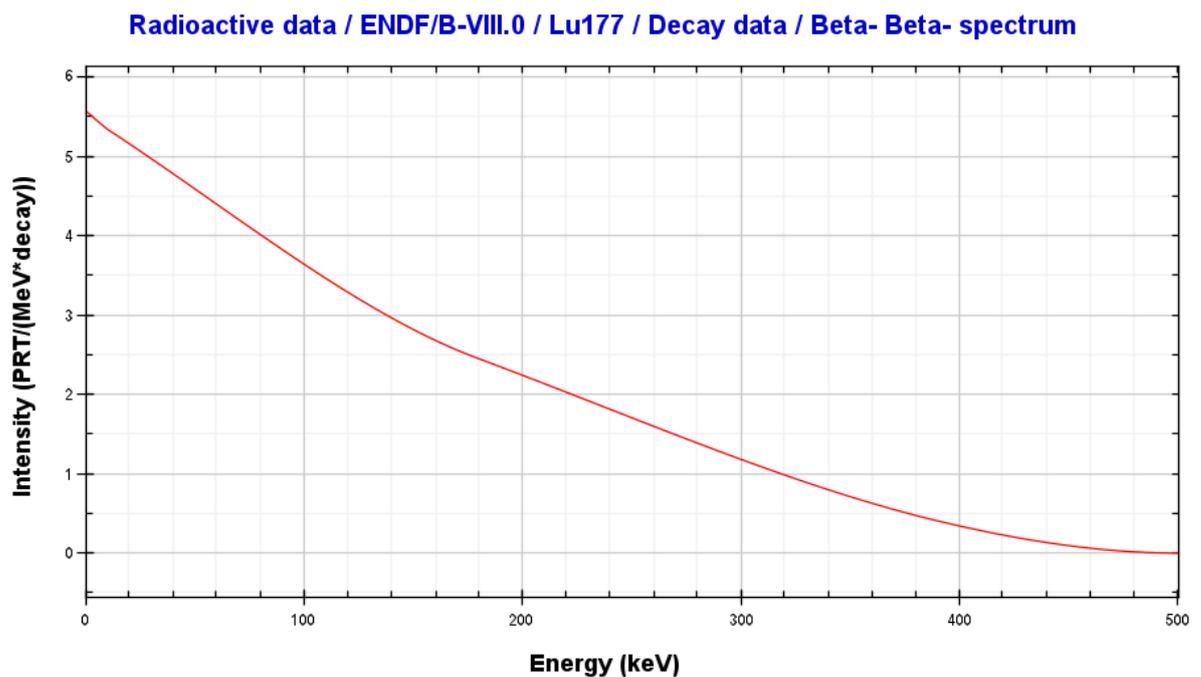


Figure 2.9 – Theoretical energy spectrum of beta radiation of lutetium-177

Figures 2.10 and 2.11 show the gamma and beta energy spectra of lutetium-177 obtained after radioisotope decay in GEANT4. As can be seen, the modelled spectra are identical to the theoretical ones. The peaks in the energy range in Figure 2.8 correspond to internal conversion electrons resulting from the transition of hafnium-177 atomic nuclei from the excited isomeric state to a lower energy state.

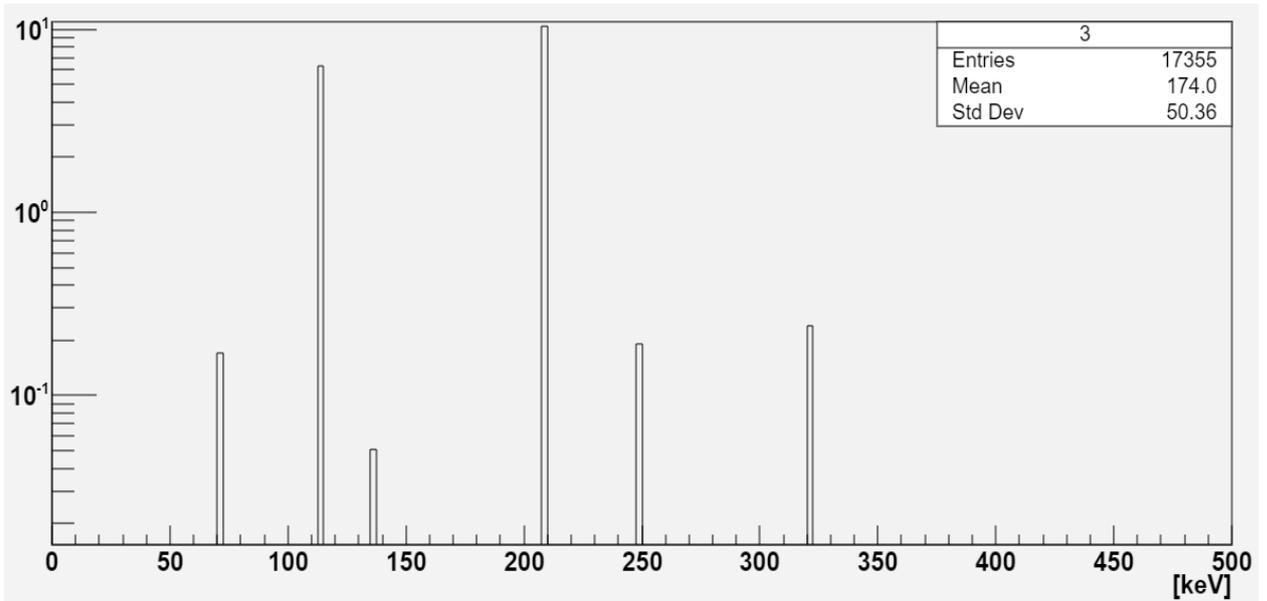


Figure 2.10 – Simulated energy spectrum of gamma radiation of lutetium-177

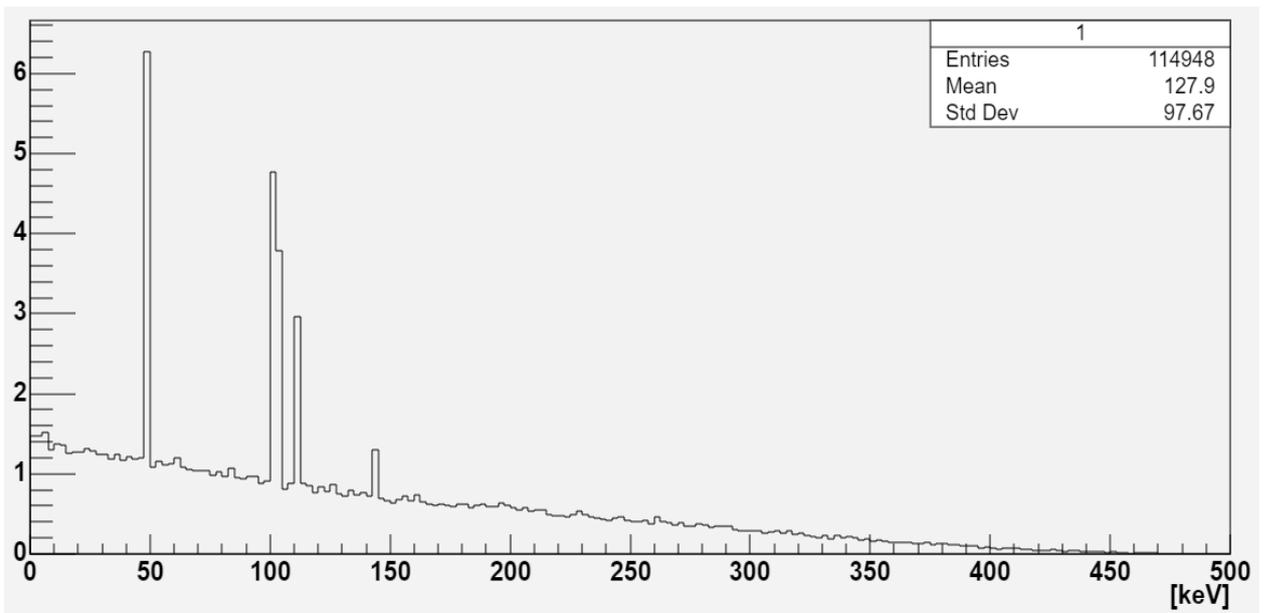


Figure 2.11 – Simulated energy spectrum of beta radiation of lutetium-177

Figure 2.12 shows the characteristic chain decay of lutetium-177 to stable hafnium-177, showing the formation of isomeric states of hafnium, whose decay is due to the escape of internal conversion electrons.

```

### Run 0 starts on worker thread 4.
--> Event 0 starts with initial seeds (54993585,29687661).
    End of event. Decay chain: Lu177 ---> Hf177
-----
### Run 4 starts on worker thread 4.
--> Event 0 starts with initial seeds (1164550,46999296).
    End of event. Decay chain: Lu177 ---> Hf177[321.316] ---> Hf177[112.950] ---> Hf177
-----
### Run 7 starts on worker thread 3.
--> Event 0 starts with initial seeds (94571398,85431497).
    End of event. Decay chain: Lu177 ---> Hf177[112.950] ---> Hf177
-----
[thread 3] Thread-local run terminated.
[thread 3] Run Summary
[thread 3]   Number of events processed : 1
[thread 3]   User=0.000000s Real=0.005649s Sys=0.000000s [Cpu=0.0%]

```

Figure 2.12 – Decay chains  $^{177}\text{Lu}$

The decay of 10 nuclei of  $^{177}\text{Lu}$  is shown in figure 2.13. The red tracks correspond to electrons, the green to gamma rays and the white to electron antineutrinos.

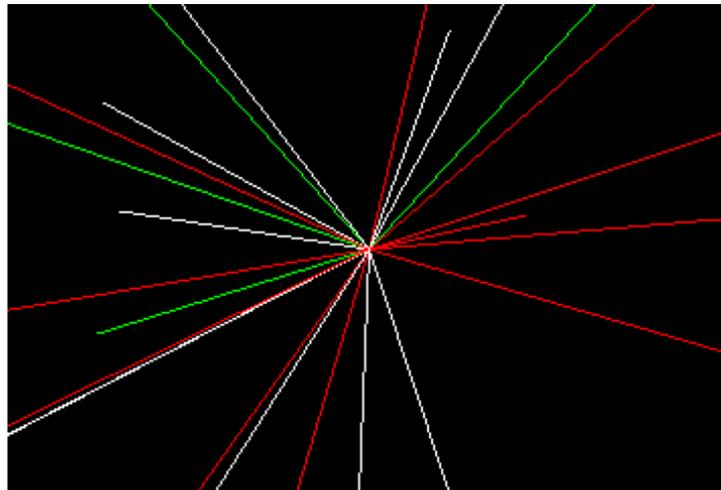


Figure 2.13 – Modelling the decay of 10 nuclei  $^{177}\text{Lu}$

## 2.4 Calculation of deposited energy

The deposited energy is calculated at each step of a particle within an event. The GetTotalEnergyDeposit() method calculates energy deposition in the volume of the unit cell for each step. The particle loses energy over its lifetime, which is

summed up by the `AddEdep()` function written. At the end of an event, the value stored in this function is passed to `Sum()`, which sums up the values of the final energies of all events. At the start (birth) of a new particle the value of `AddEdep()` is zeroed, a new calculation of the deposited energy is made. In this way the whole deposited energy at the launch of a finite number of particles is calculated.

When dealing with large amounts of data, tools are needed to analyse it. In this paper, ROOT is used for this purpose. ROOT is a software and library package developed for use as a platform for processing experimental data of high energy physics. The main initial task of the ROOT package is to present the measurement results (visualisation) in a convenient form: histograms, graphs, charts and tables. ROOT is implemented as a set of class libraries, providing the necessary functionality to work with histograms, functions, graphs, trees, etc.

The energy deposited in the ion exchange resin layers is counted during the programme run. The maximum specific activity of  $^{177}\text{Lu}$  when irradiated in neutron flux of  $1,1 \cdot 10^{14}$  is 1187,84 GBq/g. The irradiation procedure involved natural  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  (mass=1,0 g) of high chemical purity (99,999%). A solution of distilled water, 6M HCl and irradiated  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  powder is eluted through the column. The eluent passes frontally by gravity through the ion exchange resin layers, irradiating it in the process. As the source moves from one layer to the next, a counter counting the energy

deposited in the material is activated. The absorbed energy in all layers of the ion exchange resin is thus counted as shown in figure 2.14.

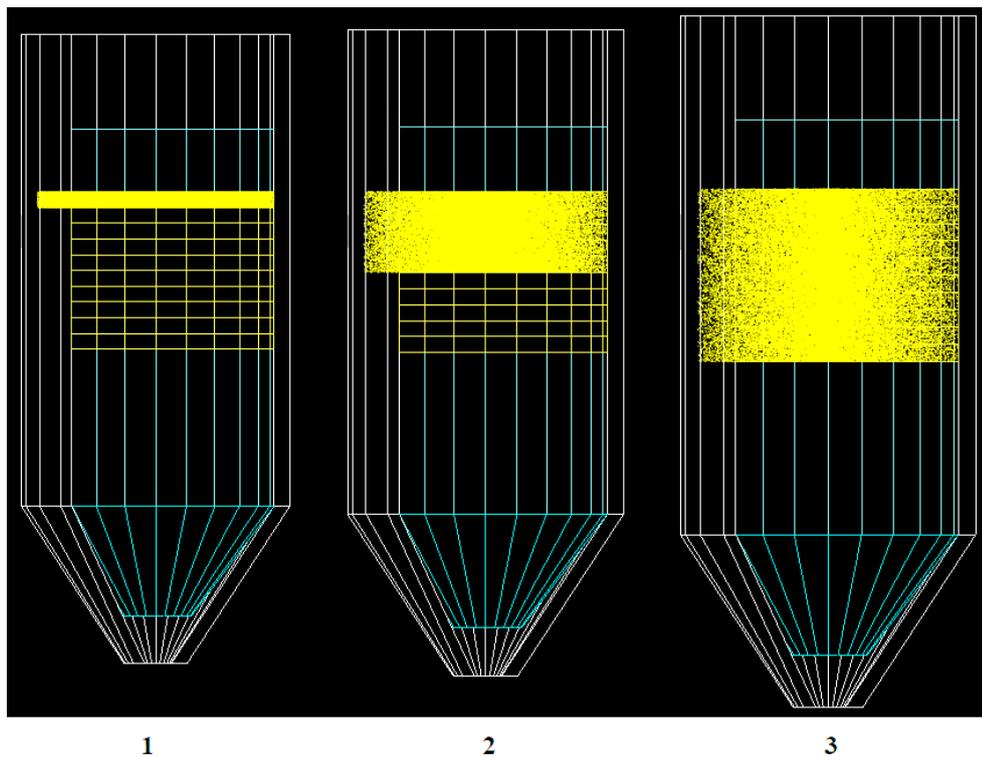


Figure 2.14 – Filling the chromatography column with eluent by ion exchange resin layer: 1 – one layer, 2 – five layers, 3 – 10 layers

The program is written in the object-oriented C++ programming paradigm using GEANT4 [12] and ROOT [13]. The program is built using the CMake system [14]. The calculation algorithm is given in appendix A.

### 3 Results of simulations of absorbed radiation dose

For simulation, 1000000 decays of  $^{177}\text{Lu}$  were carried out. Figures 3.1-3.3 show the energy absorption spectra of radiation in 1, 5 and 10 ion exchange resin layers. Table 10 shows the computed dose rate and absorbed dose. When all activity (1181,9 GBq) passed through the column, the average absorbed dose was 2,74 kGy. The ion exchange resin was not damaged, and the exchange capacity may not have been affected, because the average absorbed dose was less than the theoretical value. If the adsorbed dose was 1 MGy or above, major changes in resin characteristics would occur [15, 16].

Table 3.1 – Total absorbed dose

Layer	Total Dose Rate (Gy/Hr)	Total Absorbed Dose (Gy)
1	4509,0	3006,0
2	4567,2	3044,8
3	4570,2	3046,8
4	4570,8	3047,2
5	4570,2	3046,8
6	4579,5	3053,0
7	4560,9	3040,6
8	4568,1	3045,4
9	4567,2	3044,8
10	4505,0	3003,0

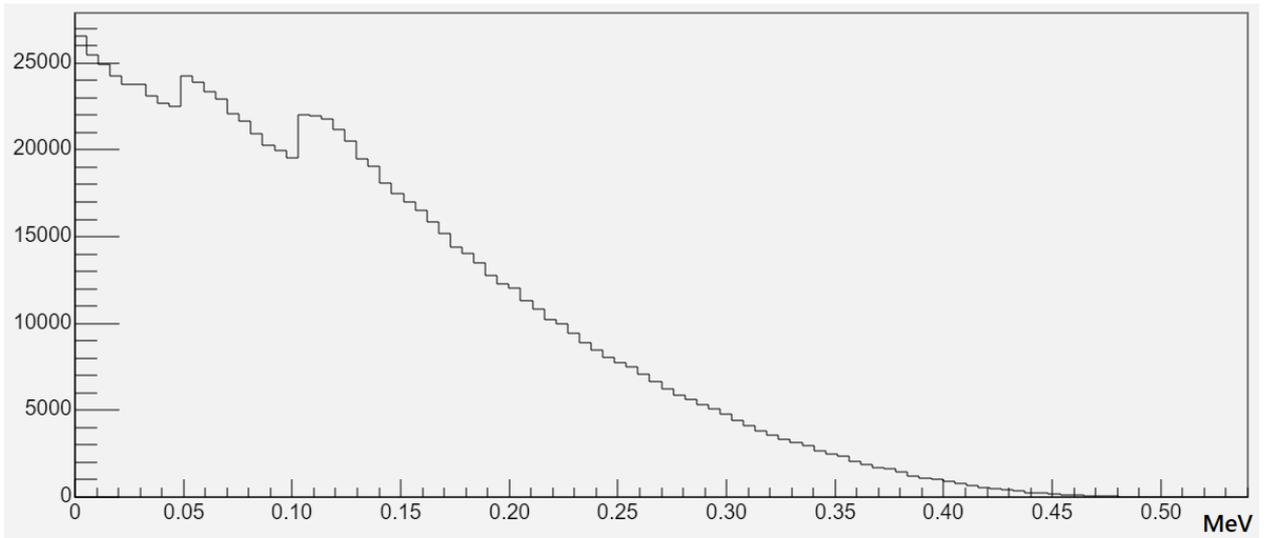


Figure 3.1 – Absorbed energy spectrum in ion exchange resin layer 1

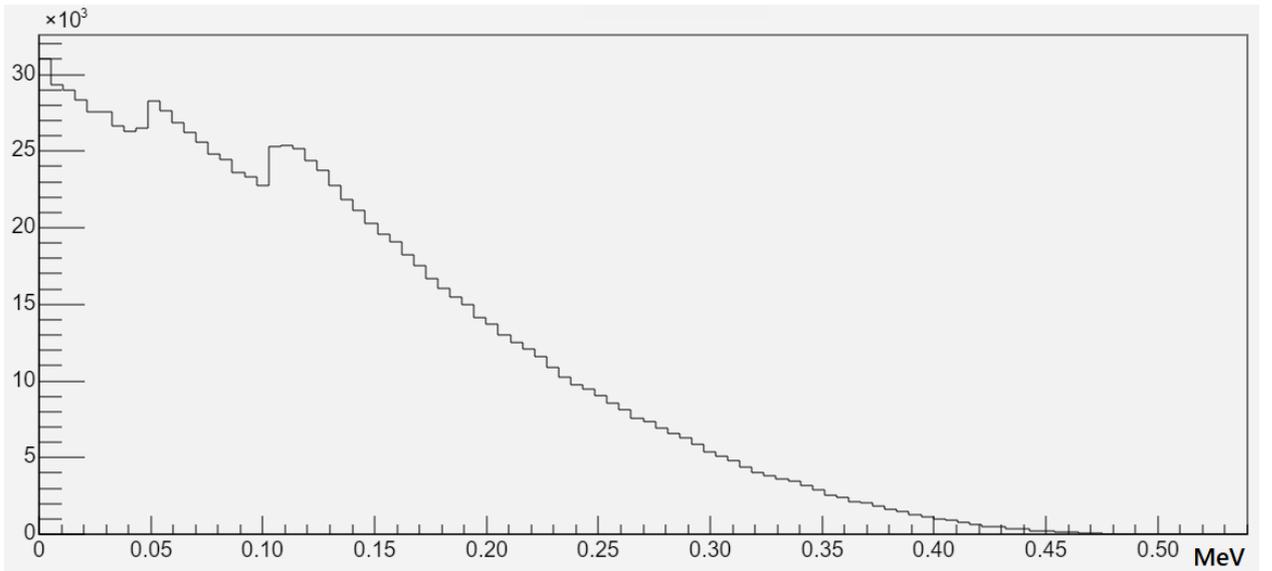


Figure 3.2 – Absorbed energy spectrum in ion exchange resin layer 5

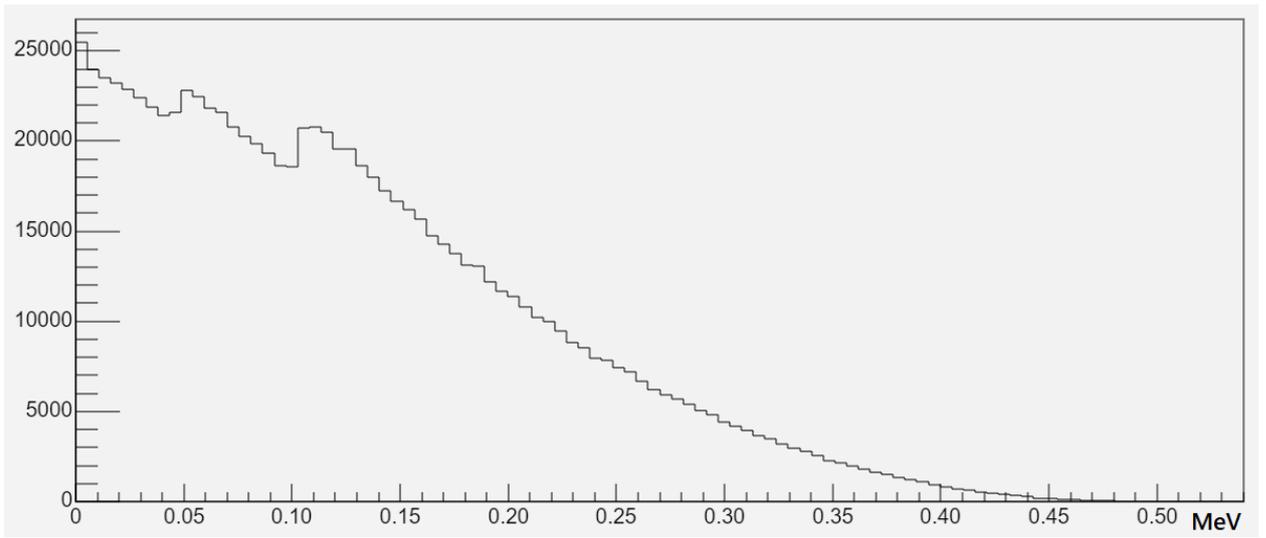


Figure 3.3 – Absorbed energy spectrum in ion exchange resin layer 10

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0A92	Черткову Михаилу Сергеевичу

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

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Бюджет проекта – не более 66,4 тыс. руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 186 тыс. руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4 баллов из 5.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Тариф отчислений во внебюджетные фонды (страховых взносов) – 30%.</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Анализ потенциальных потребителей результатов исследования. Исследование конкурентных технических решений. Проведение SWOT-анализа</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения научного исследования. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Проведение оценки сравнительной эффективности проекта.</i>

**Перечень графического материала**

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
профессор ОСГН ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0A92	Чертков Михаил Сергеевич		

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

Очевидно, что уровень и скорость развития предприятий тесно связаны с научными исследованиями, которыми обладают эти предприятия. Исследования и инновации способствуют повышению производительности бизнеса и эффективности производства. По этой причине, технологии являются наиболее значимой проблемой, волнующей развитые и развивающиеся страны. Исследования, несомненно, оказывают влияние на все сферы социально-экономической жизни, существенно изменяя образ жизни, привычки и мышление каждого современного человека.

Однако следует отметить, что исследования далеко не так просты, как могут показаться на первый взгляд. Очень сложно дать адекватную оценку потенциальной прибыльности проекта, особенно в случаях, когда на рынке нет аналогов для разрабатываемого объекта. Трудно предсказать будущие продажи, определить оптимальную цену и точно определить затраты на каждом этапе реализации проекта и внедрения разработки. Однако все эти шаги являются важными для оценки прибыльности проекта.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательской работы.

#### 4.1 Потенциальные потребители

В ходе выполнения данной работы была разработана расчетная модель для испытания характеристик материала, предназначенного для защиты от ионизирующего излучения.

Результатом бакалаврской работы является разработанная программа моделирования испытаний эффективности защиты от ионизирующего излучения, исполненной из монтмориллонита, в прямой корреляции с поглощённой вышеупомянутым материалом дозы.

В качестве потенциальных потребителей результатов проведенного исследования может выступать Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами (далее – РАО), занимающийся конструированием пунктов захоронения радиоактивных отходов (далее – ПЗРО) или любые другие потребители, занимающиеся изготовлением средств защиты от ионизирующего излучения (экраны, ослабляющие материалы и т.п.).

Рынок услуг можно сегментировать по степени необходимости использования данной методики. Результаты сегментации представлены в таблице 1.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка

		Программа для моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с материалом		
		Атомная промышленность	Научная отрасль	Ядерная медицина
Потребность	Сильная			
	Слабая			

#### 4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Для конкурентных технических решений и проведения анализа конкурентоспособности используется оценочная карта, приведенная в таблице 1. Каждый реактор оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$\text{Б}_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентноспособность		
		БС	БВ	ББ	КС	КВ	КБ
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Простота эксплуатации	0,1	4	2	2	0,4	0,2	0,2
2. Точность расчёта	0,2	4	4	3	0,8	0,8	0,6
3. Требования к вычислительным ресурсам	0,1	2	5	4	0,2	0,5	0,4
4. Функциональная мощность	0,1	5	3	2	0,5	0,3	0,2
5. Универсальность	0,1	5	4	2	0,5	0,4	0,2
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность	0,1	3	3	2	0,3	0,3	0,2
2. Затраты на разработку	0,2	5	5	5	1	1	1
3. Расчётный срок службы	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
4. Финансирование развития	0,05	2	2	2	0,1	0,1	0,1
Итого	1				4,05	3,8	3,1

Анализ конкурентных технических решений позволяет своевременно вносить коррективы в проект, чтобы более успешно противостоять конкурентам. Поскольку рынки находятся в постоянном движении, необходимо периодически проводить такой анализ.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

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

В рамках первого этапа SWOT-анализа научно-исследовательского проекта осуществляется описание сильных и слабых сторон внешней и внутренней составляющих вышеупомянутого. Результаты, полученные в ходе анализа, представлены в виде матрицы SWOT в таблице 3.

Таблица 4.3 – Матрица SWOT-анализа

<b>Сильные стороны (С)</b>	<b>Возможности (В)</b>
<p>С1. Наличие программного обеспечения (далее – ПО), достаточного для проведения исследований;</p> <p>С2. Приведенные расчёты могут поспособствовать реализации новых наиболее эффективных видов защиты от ИИ;</p> <p>С3. Актуальность данного проекта;</p> <p>С4. Наличие опытного руководителя;</p> <p>С5. Заявленная возможность к замещению относительно традиционных конкурентных решений.</p>	<p>В1. Увеличение спроса на подобные технологии;</p> <p>В2. Проведение большого количества тематических научных конференций;</p> <p>В3. Большой потенциал применения расчетов в мировой атомной отрасли;</p> <p>В4. Большое количество публикаций о РАО;</p> <p>В5. Публикация методических пособий к новому ПО.</p>
<b>Слабые стороны (Сл)</b>	<b>Угрозы (У)</b>
<p>Сл1. Необходимость в относительно немалых вычислительных мощностях;</p> <p>Сл2. Значительные временные и интеллектуальные затраты;</p> <p>Сл3. Необходимость в значимом уровне владения несколькими языками программирования;</p> <p>Сл4. Отсутствие сведений о сложности внедрения технологии, а также о её жизнеспособности;</p>	<p>У1. Сокращение доли ядерной энергетики как следствие внедрения новых источников;</p> <p>У2. Ограничения возможности использования зарубежных технологических решений;</p> <p>У3. Сокращение финансирования;</p> <p>У4. Ограничение иностранными государствами доступ к своим технологиям;</p>

Сл5. Отсутствие методических пособий к новому ПО.

У5. Отсутствие технологической базы для реализации разрабатываемого продукта.

Второй этап SWOT-анализа подразумевает установление соответствия сильных и слабых сторон внешним условиям окружающей среды. Результаты представлены в виде четырех интерактивных матриц SWOT в таблицах 4-7.

Таблица 4.4– Интерактивная матрица соответствия (В – С)

Сильные стороны проекта						
Возможности		С1	С2	С3	С4	С5
	В1	+	+	+	+	0
	В2	+	+	+	+	0
	В3	+	+	+	+	0
	В4	0	0	0	+	+
	В5	-	0	0	-	0

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица соответствия (В – СЛ)

Слабые стороны проекта						
Возможности		СЛ1	СЛ2	СЛ3	СЛ4	СЛ5
	В1	О1	0	-	0	0
	В2	О2	+	0	-	0
	В3	О3	0	-	-	0
	В4	О4	0	0	-	0
	В5	О5	0	0	0	0

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица соответствия (У – С)

Сильные стороны проекта						
Угрозы		С1	С2	С3	С4	С5
	У1	-	0	-	-	0
	У2	+	+	0	-	0
	У3	0	0	+	0	-
	У4	+	0	0	-	0
	У5	0	0	-	0	-

Таблица 4.7 – Интерактивная матрица соответствия (У – СЛ)

Слабые стороны предприятия						
Угрозы		СЛ1	СЛ2	СЛ3	СЛ4	СЛ5
	У1	0	0	0	0	-
	У2	-	0	-	0	0
	У3	0	+	0	+	0
	У4	+	0	0	0	0
	У5	0	-	+	0	-

Заключительный этап SWOT-анализа подразумевает составление унитарной SWOT-матрицы на основе упрощенной и интерактивной матриц. Результаты представлены ниже (см. таб.8)

Таблица 4.8 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p><b>С1. Наличие программного обеспечения (далее – ПО), достаточного для проведения исследований;</b>  <b>С2. Приведенные расчёты могут поспособствовать реализации новых наиболее эффективных видов защиты от ИИ;</b>  <b>С3. Актуальность данного проекта;</b>  <b>С4. Наличие опытного руководителя;</b>  <b>С5. Заявленная возможность к замещению относительно традиционных конкурентных решений.</b></p>	<p><b>Сл1. Необходимость в относительно немалых вычислительных мощностях;</b>  <b>Сл2. Значительные временные и интеллектуальные затраты;</b>  <b>Сл3. Необходимость в значимом уровне владения несколькими языками программирования;</b>  <b>Сл4. Отсутствие сведений о сложности внедрения технологии, а также о её жизнеспособности;</b>  <b>Сл5. Отсутствие методических пособий к новому ПО.</b></p>
<p><b>В1. Увеличение спроса на подобные технологии;</b>  <b>В2. Проведение большого количества тематических научных конференций;</b>  <b>В3. Большой потенциал применения расчетов в мировой атомной отрасли;</b>  <b>В4. Большое количество публикаций о РАО;</b>  <b>В5. Публикация методических пособий к новому ПО.</b></p>	<p>Можно отметить значимую вероятность реализации сильных сторон, но только в том случае, если будут претворены в жизнь упомянутые возможности.</p>	<p>В ряде случаев не исключается возможность усложнения планируемого хода реализации проекта.</p>
<p><b>У1. Сокращение доли ядерной энергетики как следствие внедрения новых источников;</b>  <b>У2. Ограничения возможности использования зарубежных технологических решений;</b></p>	<p>Анализ показал, что риск возникновения угроз весьма маловероятен.</p>	<p>Из результатов анализа: значимой связи между угрозами и слабыми сторонами исследуемого предприятия не прослеживается.</p>

<p><b>У3. Сокращение финансирования;</b>  <b>У4. Ограничение иностранными государствами доступа к своим технологиям;</b>  <b>У5. Отсутствие технологической базы.</b></p>		
---	--	--

## **4.2 Планирование научно-исследовательской работы**

### **4.2.1 Структура работы в рамках научного исследования**

Планирование предполагаемых работ происходит в данном порядке:

- определение структуры работы;
- определение участников каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения исследования.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Предполагаемый порядок составления этапов проведения исследовательской работы и распределение исполнителей показаны в таблице 9. Инженером является студент, выполняющий данную исследовательскую работу, руководителем является научный руководитель, выдающий задание и следящий за правильностью выполнения работ.

Таблица 4.9 – Порядок проведения исследовательской работы

Основные этапы	№	Содержание работ	Исполнитель
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение научного задания	Инженер, руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Инженер
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Выбор метода расчета и создание расчетной модели	Инженер
	6	Проведение расчетов	Инженер
Оценка результатов и оформление отчета	7	Анализ полученных результатов	Инженер Руководитель
	8	Разработка чертежа	Инженер
Оценка результатов и оформление отчета	9	Составление пояснительной записки к НИР	Инженер
	10	Оформление пояснительной записки к НИР по ГОСТу	Инженер

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{мин i} + 2t_{макс i}}{5}$$

где  $t_{ожи}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, человеко-дни;  
 $t_{мин i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, человеко-дни;  $t_{макс i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, человеко-дни.

Продолжительность каждой  $i$ -ой работы в рабочих днях:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, рабочие дни;  $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, человек.

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях;  
 $k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 118 - 14} = 1,56$$

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

Временные показатели проведения научного исследования представлены в таблице 8.

Таблица 4.10 – Временные показатели осуществления комплекса работ

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ож}$ , чел-дни			
	Бак.	Рук.	Бак.	Рук.	Бак.	Рук.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение научного задания	1	1	2	2	1,4	1,4	1,4	2
2. Выбор направления исследований	2	0	4	0	2,8	0	2,8	4
3. Подбор и изучение материалов по теме	8	0	12	0	9,6	0	9,6	15
4. Календарное планирование работ по теме	0	1	0	2	0	1,4	1,4	2
5. Выбор метода расчета и создание расчетной модели	9	0	17	0	12,2	0	12,2	19
6. Проведение расчетов	3	0	5	0	3,8	0	3,8	6
7. Анализ полученных результатов	3	3	5	5	3,8	3,8	3,8	6
8. Разработка чертежа	7	0	11	0	8,6	0	8,6	13
9. Составление пояснительной записки к НИР	9	0	17	0	12,2	0	12,2	19
10. Оформление пояснительной записки к НИР по ГОСТу	4	0	7	0	5,2	0	5,2	8
Итого:	46	5	80	9	59,6	6,6	61	94

На основе таблицы 9 составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 9).

Таблица 4.11 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп.	$T_{ki}$ , кал. дн	Продолжительность работ												
				февраль			март			апрель			май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение научного задания	1 2	2	■	■											
2	Выбор направления исследований	2	4	■	■											
3	Подбор и изучение материалов по теме	2	15	■	■	■										
4	Календарное планирование работ по теме	1	2			■										
5	Выбор метода расчета и создание расчетной модели	2	19			■	■	■								
6	Проведение расчетов	2	6					■	■							
7	Анализ полученных результатов	1 2	6						■	■						
8	Разработка чертежа	2	13							■	■					
9	Составление пояснительной записки к НИР	2	19								■	■	■			
10	Оформление пояснительной записки к НИР по ГОСТу	2	8										■	■		

Примечание:

■ – руководитель (Исп.1)

■ – инженер (Исп.2)

### 4.3 Бюджет научно-технического исследования

Бюджет проекта состоит из материальных затрат на НТИ, затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, основной заработной платы исполнителей темы, дополнительной заработной платы исполнителей темы, отчислений во внебюджетные фонды (страховые отчисления), затрат на научные и производственные командировки; контрагентных расходов, накладных расходов.

#### 4.3.1 Расчёт материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты включают в себя стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта.

Расчет материальных затрат осуществляется по формуле:

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

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

$N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 10.

Таблица 4.12 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Бумага А4	шт.	250	3,16	790
Карандаш	шт.	1	25	25
Ластик	шт.	1	12	12
Итого, рублей				827

#### 4.3.2 Основная заработная плата исполнителей

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 работника, непосредственно занятого выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{зп} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

$F_o$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 11).

Таблица 4.13 – Баланс рабочего времени

Показатель рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные и праздничные дни)	67	67
Потери рабочего времени (отпуск и невыходы по болезни)	48	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Заработная плата работника рассчитывается как:

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

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

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0.3 (т.е. 30 процентов от  $Z_{тс}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0.2 – 0.5;

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

Для руководителя  $Z_{тс1} = 29300$  руб., а для инженера  $Z_{тс2} = 3500$  руб.

Зарплата для инженера рассчитывается следующим образом:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot k_p = 3500 \cdot 1.3 = 4550 \text{ руб.};$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{4550 \cdot 10.4}{251} = 188.52 \text{ руб.}$$

Заработная плата для руководителя рассчитывается как:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 29300 \cdot (1 + 0.3 + 0.2) \cdot 1.3 = 57135 \text{ руб.};$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{57135 \cdot 10.4}{251} = 2367 \text{ руб.}$$

Результаты расчетов заработной платы руководителя и инженера представлены в таблице 12.

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{мс}}$ , руб.	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_{\text{р}}$ , дни	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель	29300	2367	10	23670
Бакалавр	3500	188,52	94	17720,88
Итого, руб.				41390,88

### 4.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды

В данном разделе отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Общая ставка взносов составляет – 30 %.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 13.

Таблица 4.15 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Основная ЗП, руб.
Руководитель	23670
Инженер	17720.88
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0.3
Итого	12417.27

#### 4.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии.

Основные работы проводились за персональным компьютером в комнате жилого дома. Время, проведенное работой у компьютера, прием равным 720 часам. Суммарная мощность оборудования: 2.35 кВт. Компьютер подключен к сети интернет, доступ к которой стоит каждый месяц 950 рублей, и полная стоимость за 4 месяца: 3800 рублей.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 4,39 \cdot 2,35 \cdot 720 = 7427,88$$

где  $C_{эл}$  – тариф на свет для населения, проживающего в Томске и других городских населенных пунктах Томской области в домах, оборудованных электрическими плитами и (или) электро-отоплением (односоставочный тариф на электроэнергию – 4,39 рублей за 1 кВт · ч);  $P$  – мощность оборудования, кВт;  $F_{об}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 7427,88 рублей

В данную работу включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по заданной теме.

Необходимые накладные расходы представлены в таблице 14.

Таблица 4.16 – Накладные расходы

Наименование	Затраты,руб.
1. Электроэнергия	7427.88
2. Печать на листах А4	500
3. Оплата интернет трафика	3800
Итого	11727,88

### 4.3.5 Формирование бюджета затрат проекта

Рассчитанная величина затрат исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Определение бюджета затрат на проект приведено в таблице 15.

Таблица 4.17 – Расчет бюджета затрат на проект

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	827
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	41390,88
3. Отчисления во внебюджетные фонды	12417,27
4. Накладные расходы	11727,88
Бюджет затрат проекта	66363,03

Таким образом, по итогу расчета бюджета затрат на осуществление исследовательского проекта можно сказать, что для этого необходимы затраты денежных средств в размере 66706,84 рублей.

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

### 4.4.1 Оценка научно-технического эффекта

Оценка научно-технического эффекта основывается на коэффициенте социально-научного эффекта:

$$H_T = \sum_{i=1}^3 r_i k_i,$$

где  $r_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го признака научно-технического эффекта;  $k_i$  – количественная оценка  $i$ -го признака.

Таблица 4.18 – Весовые коэффициенты признаков научно-технического эффекта

Признаки	Приблизительные значения
1. Степень новизны	0,6
2. Теоретический уровень	0,4
3. Возможность реализации	0,2

Таблица 4.19 – Оценка степени новизны

Степень новизны	Характеристика степени новизны	Значение
Основной	Результаты исследований открывают новое направление в этой области науки и техники.	8-10
Новый	Известные факты, закономерности объясняются по-новому или в первый раз	5-7
Относительно новый	Результаты исследования систематизируют и обобщают имеющейся информации, определить пути дальнейших исследований	2-4
Традиционный	Работа выполнена по традиционной методике, результаты исследования носят ознакомительный характер	1
Не новый	Получился результат, который был известен ранее	0

Таблица 4.20 – Оценка теоретического уровня

Теоретический уровень полученных результатов	Значение
Установление закона; разработка новой теории	9-10
Глубокая разработка проблемы: многоаспектный анализ отношений, взаимозависимости между фактами при наличии объяснение	7-8
Разработка метода (алгоритм, программа мероприятий, устройство, инновация и т.д.)	3-6
Элементарный анализ связей между фактами с наличием гипотезы, симплексного прогноза, классификации, пояснения версий или практических рекомендаций особого характера	0,6-2
Описание отдельных элементарных фактов (вещей, свойств и отношения); изложение опыта, наблюдений, результатов измерений	0-0,5

Таблица 4.21 – Вероятность реализации по времени и масштабу реализации

1.Время реализации	Значение
В первые годы	5-10
От 5 до 10 лет	3-4
Более 10 лет	0-2
2.Масштаб реализации	Значение
Одно или несколько предприятий	0-2
Промышленность	3-4
Национальная экономика	5-10

Проект оценивается следующим образом:

- оценка уровня новизны – 2;
- балл значимости теоретического уровня – 7;
- оценка вероятности реализации – 3+4=7;

$$H_T = 0,6 \cdot 2 + 0,4 \cdot 7 + 0,2 \cdot 7 = 5,4.$$

Таблица 4.22 – Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень научно-технического эффекта	Коэффициент научно-технического эффекта
Низкий	1-4
Средний	5-7
Относительно высокий	8-10
Высокий	11-14

Опираясь на данные из таблицы 20, научно-технический эффект работы можно оценить, как средний.

#### 4.4.2 Оценка сравнительной эффективности исследования

Один из вариантов выполнения заключается в выборе Python вместо C++ для написания программы. Python является более простым для освоения языком, и программы на нем создаются быстрее. Однако, так как Python является интерпретируемым языком, это может затруднить отладку программы, так как ошибки не обнаруживаются немедленно. Кроме того, скорость выполнения программы на Python будет ниже по сравнению с компилируемыми языками (аналог А).

Кроме того, можно выполнить аналогичную бакалаврскую работу, реализовав собственную методику интеграции метода Монте-Карло, не задействовав библиотеку пакета GEANT4 (аналог Б).

Окончательный бюджет всех вариантов реализации бакалаврской работы сведен в таблицу 21.

Таблица 21 – Бюджет для различных вариантов исполнения

Вариант исполнения	Бюджет, руб.	Интегральный финансовый показатель
Реализуемый	66363,03	0,459
Аналог А	54197,73	0,375
Аналог Б	144532,40	1

Таблица 4.23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов

Критерий	Весовой коэффициент параметра	Текущий	Аналог А	Аналог Б
Простота использования	0,1	4	4	5
Точность решения	0,3	4	4	3
Ресурсоёмкость	0,2	2	1	1
Функциональная мощность	0,2	5	2	4
Универсальность	0,2	5	5	4

$$I_T = 0,1 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 2 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 = 4;$$

$$I_1 = 0,1 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 1 + 0,2 \cdot 2 + 0,2 \cdot 5 = 3,2;$$

$$I_2 = 0,1 \cdot 5 + 0,3 \cdot 3 + 0,2 \cdot 1 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 = 3,2.$$

Таблица 4.24 – Сравнительная эффективность разработки

Проект	Текущий	Аналог А	Аналог Б
Интегральный финансовый показатель	0,459	0,375	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности	4	3,2	3,2
Интегральный показатель эффективности	8,715	8,533	3,2
Сравнительная эффективность вариантов	–	1,021	2,72

Исходя из таблицы данных, представленных в таблице 22, можно заключить: текущий проект является наиболее эффективным. В сравнении с аналогом 1, отличия не являются значительными. Основным его отличием от текущего проекта является факт, что такая работа выполняется с меньшими бюджетными затратами, однако его функциональные возможности в значительной мере ограничены, если сравнивать с текущим вариантом

реализации. Как итог, наиболее оптимальным решением будет сохранить текущую реализацию.

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

Проведенный анализ конкурентных технических решений позволяет сделать вывод, что разработанная модель обладает преимуществами в плане простоты использования, функциональной мощности и универсальности.

Кроме того, разработанная модель демонстрирует несколько преимуществ, таких как точность получаемых данных, возможность оптимизации модели, экономичность, доступность, простота использования, а также возможность получения данных с помощью компьютера. Уровень научно-технического эффекта оценивается как средний.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А92	Черткову Михаилу Сергеевичу

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии

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

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ;</li> </ul>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства и меры защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, меры предотвращения).</li> </ul>

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

Задание выдал консультант:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А92	Чертков Михаил Сергеевич		

## **5 Социальная ответственность**

### **5.1 Введение**

В настоящее время одним из основных направлений профилактической работы по снижению травмоопасности производства является внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть объединения всех связанных мероприятий в единую систему на всех стадиях производственного процесса.

Результатом бакалаврской работы является разработанная программа на языке C++ с использованием GEANT4 для моделирования поглощенной дозы ионизирующего излучения в ионообменной смоле при разделении изотопа лютеция-177 от иттербия.

В разделе рассматриваются опасные и вредные факторы, влияющие на процесс исследования, рассматривается влияние исследуемого объекта на окружающую среду, правовые и организационные вопросы, а также меры в чрезвычайных ситуациях.

Исследование проводилось в корпусе № 11 Томского политехнического университета в аудитории 302.

В данном разделе рассматриваются следующие опасные и вредные факторы:

- отклонение показателей микроклимата;
- повышенный уровень шума;
- недостаток освещения рабочей зоны;
- электробезопасность;
- взрывопожароопасность;
- радиационная безопасность.

## 5.2 Компоновка исследовательской рабочей зоны

Рабочая зона исследователя состоит из стула, рабочего стола и размещенного на столе персонального компьютера (ПК). Работа с ПК должна осуществляться в помещении площадью не менее 6 м<sup>2</sup>. Размеры рабочей поверхности стола должны соответствовать следующим параметрам: ширина не менее 1200 мм, глубина не менее 600 мм. Высота стола должна быть не менее 600 мм и позволять размещать ноги оператора, ширина основания должна быть не менее 500 мм.

Рабочее кресло (стул) должны обеспечивать поддержание оптимальной рабочей позы оператора с целью предотвращения развития усталости и снижения статического напряжения мышц. Кресло должно подбираться под рост оператора, иметь возможность регулирования высоты, угла наклона и поворота сидения и спинки, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой от остальных и легкой в проведении [17].

## 5.3 Вредные и опасные факторы рабочей зоны

В ГОСТ 12.0.003-2015 приведены потенциальные вредные и опасные факторы, которые могут иметь место при проведении запланированных работ и эксплуатации рабочего места [18].

В таблице 4.1 приведен перечень потенциальных опасных и вредных факторов, характерных для рассматриваемой производственной среды – исследовательской рабочей зоны.

Таблица 5.1 – Потенциальные опасные и вредные факторы

Факторы	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [19].
2. Повышенный шум	
3. Недостаток освещенности рабочей зоны	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение [20].

4. Воздействие электрического тока	ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [21].
5. Врывопожароопасность	ФЗ от 22.07.2008 N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [22].
6. Радиационная безопасность	СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ99/2009 [23].

#### 5.4 Микроклимат

Микроклимат рабочей среды – состояние внутренней среды рабочего помещения, оказывающее воздействие на человека, характеризуемое показателями температуры воздуха, влажностью и подвижностью воздуха.

Переносимость человеком температуры зависит от влажности и скорости окружающего воздуха. При большой влажности перегрев наступает быстрее вследствие малого испарения пота с поверхности кожи. При недостаточной влажности испарение проходит интенсивнее, что приводит к пересыханию и растрескиванию кожи и слизистых оболочек.

В таблице 4.2 представлены допустимые величины параметров микроклимата на рабочем месте [19].

Таблица 5.2 – Допустимые величины параметров микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	23÷25	15÷75	0,1
Тёплый	22÷24	15÷75	0,1

Температура аудитории 302 корпуса №11 Томского политехнического университета регулируется системой центрального отопления в холодное время года. Средняя температура аудитории составляет 23 °С и 24 °С для

тёплого и холодного времени года соответственно. Относительная влажность воздуха аудитории составляет 40 %, скорость воздуха менее 0,1 м/с.

Для поддержания данных санитарных норм достаточно иметь местный кондиционер полного кондиционирования воздуха, обеспечивающий постоянство температуры, относительной влажности, скорости движения и чистоты воздуха.

Для расчёта кратности воздухообмена вентилятора в аудитории объёмом  $V = 102 \text{ м}^3$  ( $S = 29 \text{ м}^2$ ,  $h = 3,5 \text{ м}$ ), который будет обеспечивать циркуляцию воздушных масс в помещении, воспользуемся формулой [24]:

$$W = V \cdot k,$$

где  $k$  – нормируемая кратность воздухообмена для компьютерного класса высшего учебного заведения,  $k = 2 \text{ ч}^{-1}$ , согласно [25];

Необходимая производительность воздухообмена составляет:

$$W = 102 \cdot 2 = 204 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для обеспечения такого воздухообмена в помещении достаточно разместить, например, канальный вентилятор Brofan [26], производительность которого составляет  $540 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что показатели микроклимата в аудитории № 302 11-го корпуса ТПУ удовлетворяют установленным требованиям [19].

## **5.5 Уровень шума**

На уровень шума влияет работа механических и электромеханических устройств – части электрооборудования, системы кондиционирования, вентиляторы охлаждения ПК. Максимальный уровень звука при постоянном шуме составляет 30 дБА, при непостоянном – 55 дБА [19]. Постоянный шум негативно влияет на работоспособность и нервную систему человека.

Основным источником шума для аудитории 302 является шум вентиляторов охлаждения ПК. Для используемых ПК уровень шума,

создаваемого вентилятором, согласно описанию системы, не превышает 20 дБ. При условии, что шум вентилятора зависит от задействованной вычислительной мощности ПК, его можно считать непостоянным источником шума, поэтому общий уровень шума в помещении не превышает установленный предел [19]. Дополнительная шумоизоляция оборудования не требуется.

В качестве профилактических мероприятий предлагается своевременная очистка и смазывание движущихся деталей охлаждающих систем ПК.

В аудитории № 302 учебного корпуса № 11 ТПУ предельный уровень шума не превышает установленных нормативных значений [19].

## **5.6 Освещенность**

Недостаточная освещенность рабочей зоны также влияет на работоспособность и утомляемость человека. Главной задачей светотехнических расчётов является определение требуемой мощности электрической освещённости.

Для рассматриваемого типа работ допускается применение системы общего равномерного освещения. Общее освещение – освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения. В зависимости от расположения светильников различают равномерное и локализованное освещение. При равномерном освещении светильники располагаются в верхней зоне помещения равномерно, обеспечивая одинаковую освещенность помещения. При общем искусственном освещении средняя освещенность рабочих поверхностей должна быть равной 500 люкс [20].

Расчёт освещения горизонтальной рабочей поверхности проводится методом коэффициента светового потока, учитывающим отражение от потолка и стен помещения.

Световой поток  $\Phi$  определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot \eta},$$

где  $E_n$  – нормируемая минимальная освещенность, равная 400 лк;

$S$  – Площадь освещаемого помещения, равная 29 м<sup>2</sup>;

$K_z$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, берется равным 1,5;

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения, равный 1,1;

$N$  – число ламп в помещении, равное 12 шт.;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп падает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса  $i$  помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)},$$

где  $A$  – длина помещения, равная 5,8 м;

$B$  – ширина помещения, равная 5 м;

$h$  – расстояние от светильника до рабочей поверхности, равное 2 м.

Индекс помещения равен:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{29}{2 \cdot (5,8 + 5)} = 1,34.$$

Стены – свежепобеленные, коэффициент отражения  $\rho_c = 50 \%$  ,  
потолок – светлый, деревянный, коэффициент отражения  $\rho_{\text{п}} = 50 \%$  .

Коэффициент использования светового потока равен 56 %.

Величина светового потока равна:

$$\Phi = \frac{400 \cdot 29 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,56} = 2848 \text{ лм.}$$

Такой световой поток может обеспечить светильник Phobus ARC-30 Eco (30 Вт) [27] со световым потоком 3000 лм и диапазоном цветовой температуры 4000-4500 К.

Фактическое освещение аудитории № 302 11-ого корпуса Томского политехнического университета соответствует установленным нормам [20].

### **5.7 Электробезопасность**

Электробезопасность зависит от условий помещения, в котором проводятся работы. В условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С) или наличия токопроводящих поверхностей или материалов не следует работать с электронно-вычислительной техникой [21].

Аудитория 302 удовлетворяет условиям безопасности по уровню влажности и температуре в помещении. Аудитория относится к 1-й категории электробезопасности, в помещении не располагаются электроустановки с напряжением выше 1000 В [21]. Работа осуществляется посредством взаимодействия человека с ПК и периферийными устройствами. В таком случае опасность поражения электрическим током возможно в следующих случаях:

- при прикосновении к токоведущим частям при проведении ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям при нарушении изоляции токоведущих частей ЭВМ;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках питания и блоке дисплейной развёртки;
- при прикосновении к поверхностям (стены, пол), оказавшимся под напряжением;

Для обеспечения электробезопасности могут быть приняты следующие меры:

- отключение напряжения с токоведущих частей устройств, вблизи которых будет проводиться работа, если работа не связана с использованием самих устройств;

- заземление корпусов устройств через нулевой провод;
- покрытие проводящих поверхностей изоляцией;
- физическое ограничение токоведущих частей аппаратуры;

вывешивание предупреждающих плакатов и информационных табличек [21].

В аудитории № 302 учебного корпуса № 11 ТПУ электробезопасность соответствует установленным нормам [21].

## **5.8 Взрывопожароопасность**

Категория опасности помещений зависит от вида и количества находящихся в помещении горючих материалов и их пожароопасных свойств. Всего выделяют пять категорий взрывопожароопасности:

- А – повышенная взрывопожароопасность;
- Б – взрывопожароопасность;
- В1÷В4 – пожароопасность;
- Г – умеренная пожароопасность;
- Д – пониженная пожароопасность [22].

Помещение аудитории 302 относится к категории В3 ввиду наличия экспериментальной установки, включающей трубчатый нагреватель, а также веществ, способных к воспламенению при контакте с водой или кислородом [22].

Для обеспечения пожарной безопасности могут быть приняты организационные, технические и режимные меры:

- соблюдение правил эксплуатации приборов, порядка в помещении, периодическое проведение инструктажа для сотрудников;
- соблюдение правил пожарной безопасности на этапе проектирования помещения;
- запрещение иной деятельности, связанной с использованием открытого пламени, внутри помещения.

При обнаружении пожара или задымления сотрудник должен вызвать службу оперативного реагирования и сообщить руководителю о пожаре.

В аудитории № 302 учебного корпуса № 11 ТПУ взрывопожароопасность соответствует установленным нормам [22].

## **5.9 Радиационная безопасность**

Основные принципы радиационной безопасности [23]:

- принцип нормирования: непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения от всех источников;
- принцип обоснования: запрещение всех видов деятельности по использованию источников, если полученная от этого польза не превышает риск возможного вреда, причиненного излучением;
- принцип оптимизации: поддержание индивидуальных доз облучения и числа облучаемых на возможно низком и достижимом уровне.

В НРБ-99/2009 [23] выделяются три группы лиц, взаимодействующих с излучением: персонал группы А, Б и все остальное население.

Эффективная доза для персонала группы А от всех источников не должна быть больше 20 мЗв в год в среднем за последовательные 5 лет, но не должна превышать 50 мЗв за один год. Для персонала группы Б аналогично средняя доза за год не должна быть больше 1 мЗв и не больше 5 мЗв за один год. Для студентов, проходящих обучение с использованием источников излучения, полученные дозы не должны превышать установленную для персонала группы Б.

В аудитории 302 источники излучения не размещены, также не происходит взаимодействия работников с источниками излучения, то есть аудитория соответствует нормам радиационной безопасности [23].

## **5.10 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, природного явления или иного события, повлекшая за собой ущерб здоровью людей, окружающей среде или материальным ценностям. ЧС могут быть как техногенного (пожары, взрывы, аварии), так и природного характера (стихийные бедствия) [12].

В таблице 4.3 приведены наиболее вероятные аварийные (АС) и чрезвычайные (ЧС) ситуации, а также меры по их предотвращению и ликвидации последствий.

Таблица 5.3 – АС и ЧС, меры по их предотвращению и ликвидации последствий

№	АС/ЧС	Меры по предотвращению АС/ЧС	Меры по ликвидации последствий АС/ЧС
1	Пожар	Проведение инструктажа по технике безопасности, соблюдение правил пожарной безопасности, контроль и обслуживание электрических устройств.	Вызвать службу оперативного реагирования по номеру 112, сообщить руководителю и действовать по его инструкциям
2	Поражение электрическим током	Проведение инструктажа по технике безопасности, соблюдение правил электробезопасности, контроль и обслуживание электрических устройств.	Провести осмотр травмированной области. При наличии серьезных повреждений вызвать службу оперативного реагирования по номеру 112, сообщить руководителю и действовать по его инструкциям
3	Травмирование при падении с высоты	Проведение инструктажа по технике безопасности, аккуратное обращение с оборудованием, которое может повлечь травмирование персонала, соблюдение правил безопасности при проведении работ на высоте, превышающей рост собственного тела.	Провести осмотр травмированной области. При наличии серьезных повреждений вызвать службу оперативного реагирования по номеру 112, сообщить руководителю и действовать по его инструкциям

### 5.11 Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В ходе выполнения задания рассмотрены следующие опасные и вредные факторы, оказывающие влияние на работу исследователя:

- отклонение показателей микроклимата [19];
- повышенный уровень шума [19];
- недостаточная освещенность рабочей зоны [20];
- электробезопасность [21];
- взрывопожаропопасность [22];
- радиационная безопасность [23].

Помещение аудитории 302 корпуса № 11 Томского политехнического университета относится к категории В по пожаровзрывобезопасности [22] и к 1 категории электробезопасности [21]. Условия микроклимата, уровня шума, освещенности, электробезопасности и пожаровзрывобезопасности соответствуют необходимым требованиям. Работы с источниками ионизирующего излучения не проводились.

Также в разделе рассмотрены наиболее вероятные аварийно-спасательные и чрезвычайные ситуации, которые могут произойти в аудитории 302, меры противодействия и ликвидации их последствий.

## Conclusions

1. A program was written for calculating the absorbed dose rate at cation exchange resin when separating lutetium and ytterbium isotopes.

2. Models of a chromatographic column filled with ion-exchanger and a radiation source were constructed. It is shown that the obtained gamma- and beta-radiation spectra of lutetium-177 are in good agreement with the known experimental spectra.

3. It is shown that when the eluent passes along the resin, the distribution of the absorbed dose rate along the length of the chromatographic column agrees with the experimental data and corresponds to the values of about 4540 Gy/Hr.

The developed program can be used for determination of the absorbed dose rate in experiments on the impact of radiation on ion-exchangers during the separation of radioactive elements by ion-exchange chromatography.

## List of sources used

1. Производство лютеция-177: технологические аспекты / Р. А. Кузнецов, К. С. Бобровская, В. В. Светухин [и др.] // Радиохимия. – 2019. – Т. 61, № 4. – С. 273-285. – DOI 10.1134/S0033831119040014. – EDN UVRBPW.
2. Патент № 2573475 С2 Российская Федерация, МПК G21G 4/04, G21G 4/08, C01F 17/00. Способ получения высокочистых соединений  $^{177}\text{Lu}$ , свободных от носителя, а также соединения  $^{177}\text{Lu}$ , свободные от носителя : № 2013155710/05 : заявл. 12.04.2012 : опубл. 20.01.2016 / С. Маркс, М. Харфенштеллер, К. Жерносеков, Т. Никула ; заявитель ИТМ ИЗОТОПЕН ТЕХНОЛОГИЕН МЮНХЕН АГ. – EDN KFDEMY.
3. Banerjee S, Pillai MR, Knapp FF. Lutetium-177 therapeutic radiopharmaceuticals: linking chemistry, radiochemistry, and practical applications. Chem Rev. 2015 Apr 22;115(8):2934-74. doi: 10.1021/cr500171e. Epub 2015 Apr 13. PMID: 25865818.
4. Тарасов Валерий Анатольевич, Романов Евгений Геннадьевич, Кузнецов Ростислав Александрович Сравнительный анализ схем реакторной наработки лютеция-177 // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. №4-5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-shem-reaktornoy-narabotki-lyutetsiya-177> (дата обращения: 13.05.2023).
5. Kazakov, A.G.; Ekatoва, T.Y.; Babenya, J.S.; Belyshev, S.S.; Khankin, V.V.; Kuznetsov, A.A.; Vinokurov, S.E.; Myasoedov, B.F. Recovery of  $^{177}\text{Lu}$  from Irradiated  $\text{HfO}_2$  Targets for Nuclear Medicine Purposes. Molecules 2022, 27, 3179. <https://doi.org/10.3390/molecules27103179>
6. Производство лютеция-177: технологические аспекты / Р. А. Кузнецов, К. С. Бобровская, В. В. Светухин [и др.] // Радиохимия. – 2019. – Т. 61, № 4. – С. 273-285. – DOI 10.1134/S0033831119040014. – EDN UVRBPW.
7. Термические методы выделения медицинских радионуклидов из облученных мишеней : диссертация ... кандидата химических наук : 02.00.14 / Кротов Сергей Алексеевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-

Петербургский государственный университет»]. - Санкт-Петербург, 2019. - 295 с. : ил.; 14,5x20,5 см.

8. Нестеров В. Ю. Иониты и ионообмен. Сорбционная технология при добыче урана и других металлов методом подземного выщелачивания / В. Ю. Нестеров. – Москва : ОАО «Атомредметзолото», 2007. – 480 с. – ISBN 978-5-94982-039-8.

9. Патент № 2763745 С1 Российская Федерация, МПК G21G 1/06, С22В 59/00. Способ катионообменного выделения радионуклида лютеция-177 из облученного в ядерном реакторе иттербия : № 2021115877 : заявл. 02.06.2021 : опубл. 10.01.2022 / О. И. Андреев, Г. В. Гончарова, В. А. Дитяткин, Э. А. Зотов ; заявитель Акционерное общество "Государственный научный центр - Научно-исследовательский институт атомных реакторов". – EDN VOPBSS.

10. Водоподготовка. Физико-химические основы процессов обработки воды: учебное пособие / В.А. Карелин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 97 с.

11. Материаловедение полимеров и композиционных материалов на их основе: моногр. / В.Н. Вернигорова, С.М. Саденко. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 420 с. ISBN 978-5-9282-0882-0

12. Knapp FF, Jr, Mirzadeh S, Beets AL, Du M. Production of therapeutic radioisotopes in the ORNL High Flux Isotope Reactor (HFIR) for applications in nuclear medicine, oncology and interventional cardiology. J Radioanal Nucl Chem. 2005;263:503–509. doi: 10.1007/s10967-005-0083-4.

13. Firestone R. Table of Isotopes. 8. New York: Wiley; 1996.

14. Geant4 A simulation toolkit: [Электронный ресурс]. URL: <https://geant4.web.cern.ch/>. (Дата обращения 10.03.2023).

15. ROOT: analyzing petabytes of data, scientifically: [Электронный ресурс]. URL: <https://root.cern/>. (Дата обращения 15.03.2023).

16. CMake: [Электронный ресурс]. URL: <https://cmake.org/>. (Дата обращения 20.04.2023).

17. Physics Reference Manual: [Электронный ресурс]. URL: <https://indico.cern.ch/event/679723/contributions/2792554/attachments/1559217/2454299/PhysicsReferenceManual.pdf>. (Дата обращения 20.04.2023).

18. 14. D. Cullen, J.H. Hubbell, and L. Kissel. Epd197: the evaluated photon data library, '97 version. UCRL-50400, 6(Rev.5):, 1989. <http://reddog1.llnl.gov/homepage.red/photon.htm>.

19. 15. M.J. Berger and J.H. Hubbel. Xcom: photom cross sections on a personal computer. Technical Report Report NBSIR 87-3597, National Bureau of Standards, 1987.

20. 16. S.M.Seltzer S.T.Perkins, D.E.Cullen. Tables and graphs of electroninteraction cross-sections from 10 ev to 100 gev derived from the llnl evaluated electron data library (eedl), z=1-100. Technical Report UCRL-50400 Vol.31, Lawrence Livermore National Laboratory, 1989.

21. Синтетические ионообменные материалы [Текст] / Л.Б. Зубакова, А.С. Тевлина, А.Б. Даванков. - Москва : Химия, 1978. - 183 с.

22. Выделение и концентрирование актинидов из азотнокислых растворов с применением новых ионообменных материалов : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.17.02 / Лызлова Евгения Викторовна; [Место защиты: Высокотехнол. науч.-исслед. ин-т неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара]. - Озёрск, 2015.

23. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования: дата введения 1979-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003913> (дата обращения 11.05.2023) – Текст: электронный.

24. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация: дата введения 2017-03-01. URL:

<https://docs.cntd.ru/document/1200136071> (дата обращения 11.05.2023) – Текст: электронный.

25. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года N 2. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6560IO> (дата обращения 11.05.2023). – Текст: электронный.

26. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение: дата введения 2017-05-08. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения 11.05.2023). – Текст: электронный.

27. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность: дата введения 1983-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (дата обращения: 11.05.2023). – Текст: электронный.

28. Российская Федерация. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности": принят Государственной Думой 4 июля 2008 года: одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 года]. – Текст: электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения 11.05.2023). – Текст: электронный.

29. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения 11.05.2023). – Текст: электронный.

30. СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: дата введения 30.12.2020 – URL: <https://clck.ru/34bTuk> (дата обращения 10.05.2023). – Текст: электронный.

31. СП 118.13330.2012 Общественные здания и сооружения: дата введения 29.12.2011 – URL: <https://clck.ru/34bTwa> (дата обращения 10.05.2023). – Текст: электронный.

32. Вентилятор канальный БРОFAN 500 м3/ч 150 мм [Электронный ресурс]: – 2022 – Режим доступа: <https://clck.ru/34bQ7v> – Загл. с экрана (дата обращения 9.05.2023).

33. Промышленный светодиодный LED светильник Phobus ARC-30 Eco [Электронный ресурс]: – 2022 – Режим доступа: <https://www.ledit.ru/hardware/industriallights/arc-30-eco/> – Загл. с экрана (дата обращения 9.05.2023).

# Appendix A

