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
Исследование эффективности регистрации и энергетического разрешения в альфа-спектрометрических измерениях с различными параметрами коллиматоров

УДК 539.164.08:681.777.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А91	Котляревская Анна Сергеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Кузнецов Михаил Сергеевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Селиваникова Ольга Валерьевна			

Томск – 2023 г.

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

School School of Nuclear Science & Engineering
Specialty 14.03.02 Nuclear Science and Technology
School division Nuclear Fuel Cycle Division

BACHELOR THESIS

Topic of the work
Investigation of counting efficiency and energy resolution of alpha spectrometric measurements varying collimator parameters

UDC 539.164.08:681.777.7

Student

Group	Full name	Signature	Date
0A91	Anna Sergeevna Kotliarevskaia		

Scientific supervisor

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Assistant professor of NFCD of SNSE	Mikhail Sergeevich Kuznetsov	PhD		

ADVISERS:

Section «Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving»

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Assistant professor of SSHD of SCEE	Lyubov Yurievna Spitsyna	PhD		

Section «Social Responsibility»

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Assistant professor of NFCD of SNSE	Yuri Vladimirovich Perederin	PhD		

ADMITTED TO PRESENTATION:

Programme Director	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Nuclear Science and Technology	Olga Valerievna Selivanikova			

Tomsk – 2023 y.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
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
Общепрофессиональные компетенции	
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
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
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

LEARNING OUTCOMES

Competence code	Competence name
Universal competencies	
UC(U)-1	Able to search, critically analyze and synthesize information, apply a systematic approach to solve tasks
UC(U)-2	Able to determine the range of tasks within the set goal and choose the best ways to solve them, based on current legal regulations, available resources and restrictions
UC(U)-3	Able to carry out social interaction and realize their role in the team
UC(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)
UC(U)-5	Able to perceive the intercultural diversity of society in the socio-historical, ethical and philosophical contexts
UC(U)-6	Able to manage his time, build and implement the trajectory of self-development based on the principles of education throughout life
UC(U)-7	Able to maintain the proper level of physical fitness to ensure full-fledged social and professional activities
UC(U)-8	Able to create and maintain safe living conditions, including in case of emergencies
UC(U)-9	Able to show entrepreneurial activity in professional activities, including the development of a commercially promising product based on a scientific and technical idea
General professional competencies	
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
Professional competencies	
PC(U)-1	Able to use scientific and technical information, domestic and foreign experience on research topics, modern computer technologies and information resources in their subject area
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, compiling a description of ongoing research and analyzing the experimental data obtained
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 the collection and analysis of 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

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

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ _____ Селиваникова О.В.
(подпись) (дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А91	Котляревской Анне Сергеевне

Тема работы:

Исследование эффективности регистрации и энергетического разрешения в альфа-спектрометрических измерениях с различными параметрами коллиматоров	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	02.02.2023 33-77/с

Срок сдачи студентом выполненной работы	05.06.2023

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	– сведения из литературных источников; – технические характеристики источников альфа-частиц; – параметры исследуемых коллиматоров.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Рассмотреть физические основы детектирования альфа-частиц и различные альфа-спектрометры. 2. Рассмотреть схожие исследования влияния ячеистых коллиматоров на ПШПВ и эффективность. 3. Провести серию измерений ПШПВ и эффективности для коллиматоров с различными формой и размером ячейки. 4. Разработать математическую модель для данной геометрии. 5. Провести симуляцию для коллиматоров

	различной формы, размера и материала. 6. Установить оптимальные параметры коллиматора для данной геометрии.
Перечень графического материала	– блок-схема программы в Geant4; – презентация.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы *(с указанием разделов)*	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Спицына Любовь Юрьевна
Социальная ответственность	Передерин Юрий Владимирович

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	24.04.2023

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Кузнецов Михаил Сергеевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А91	Котляревская Анна Сергеевна		

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

School School of Nuclear Science & Engineering
Specialty 14.03.02 Nuclear Science and Technology
School division Nuclear Fuel Cycle Division

APPROVED BY:
Program Director

_____	_____	Selivanikova O.V.
(signature)	(date)	(full name)

ASSIGNMENT
for the Graduation Thesis completion

In the form of:

Bachelor Thesis

To student:

Group	Full name
0A91	Anna Sergeevna Kotliarevskaia

Topic of the research work

Investigation of counting efficiency and energy resolution of alpha spectrometric measurements varying collimator parameters	
Approved by the order of the Director of School of Nuclear Science & Engineering (date, number)	02.02.2023 33-77/c

Deadline for completion of Bachelor Thesis	05.06.2023

TERMS OF REFERENCE:

Initial data for the research work	– information from literary sources; – technical characteristics of alpha particle sources; – parameters of the studied collimators.
List of the issues to be investigated, designed and developed	1. To review basics of alpha detection physics and alpha spectrometry instrumentation. 2. To review results of previous researches of honeycomb collimator influence on energy resolution and counting efficiency. 3. To measure energy resolution and counting efficiency of reference alpha sources, varying collimator cell shape and size. 4. To develop a mathematical model with the same measurement geometry. 5. To simulate spectra of reference alpha sources, varying collimator cell shape and size,

	but also collimator height and material. 6. To determine optimal parameters of honeycomb collimator for particular measurement geometry.
List of graphic material	– block diagram of Geant4 program; – presentation.

Advisors to the sections of the Bachelor Thesis *(with indications of sections)*	
Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving	Lyubov Yurievna Spitsyna
Social Responsibility	Yuri Vladimirovich Perederin

Date of issuance of the assignment for Bachelor Thesis completion according to the schedule	24.04.2023

Assignment issued by a scientific supervisor:

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Assistant professor of NFCD	Mikhail Sergeevich Kuznetsov	PhD		

Assignment accepted for execution by a student:

Group	Full name	Signature	Date
0A91	Anna Sergeevna Kotliarevskaia		

Abstract

Final qualifying work contains 96 p., 29 figures, 29 tables, 46 sources of literature, 2 applications.

Key words: alpha spectrometry, collimator, counting efficiency, energy resolution, Geant4.

The object of the study is the efficiency and energy resolution of alpha spectrometric measurements.

Purpose of the work is to investigate and optimize counting efficiency and energy resolution of alpha spectrometric measurements varying collimator parameters.

An analysis of influence of the collimator geometric parameters on the counting efficiency and the energy resolution of alpha spectra is carried out by mathematical modeling and measurements on a semiconductor alpha spectrometer. It is shown that with decreasing cell diameter or increasing collimator height, counting efficiency and FWHM decrease. In terms of effects on counting efficiency and FWHM, no difference between UV-resin and aluminum collimators is discovered. For ^{241}Am, minimal theoretical energy resolution of 21.610 keV with absolute efficiency of 1.189% is shown with UV-resin hexagonal collimator of 5 mm height and 2.5 mm cell diameter. In experimental measurements, same collimator showed energy resolution of 27.4 ± 1.1 keV and absolute efficiency of 1.10 ± 0.02%.

Content

Abstract.....11

Introduction.....15

1 Literature review.....17

1.1 Alpha spectrometry.....17

1.1.1 Alpha detection physics.....17

1.1.2 Alpha-spectrometry instruments.....19

1.1.3 Detection efficiency.....24

1.1.4 Energy resolution of alpha spectra.....25

1.2 Collimation of alpha radiation.....28

1.2.1 Collimators and energy resolution of alpha spectra.....29

2 Investigation of the collimator influence on counting efficiency and energy resolution.....34

2.1 Materials and methods.....34

2.2 Simulation in Geant4.....35

2.3 Experimental results.....39

2.4 Comparison of simulation and experiment.....42

2.5 Simulation results with material varied.....45

2.6 Simulation results with collimator height varied.....47

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение…52

3.1 Оценка коммерческого потенциала научного исследования.....52

3.1.1 Портрет потенциальных потребителей результатов исследования. .53

3.1.2 SWOT-анализ.....55

3.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.....56
3.3 Планирование научно-исследовательских работ.....57
3.4 Бюджет научно-технического исследования.....60
3.4.1 Расчёт материальных затрат и затрат на ПО.....61
3.4.2 Расчёт затрат на специальное оборудование.....62
3.4.3 Расчёт затрат на основную и дополнительную заработную плату и отчислений во внебюджетные фонды.....63
3.4.4 Расчёт контрагентных и накладных расходов.....65
3.4.5 Формирование итогового бюджета.....66
3.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования...68
3.6 Заключение по разделу.....70
4 Социальная ответственность.....73
4.1 Обеспечение производственной безопасности.....74
4.1.1 Уровень шума.....75
4.1.2 Освещение.....76
4.1.3 Микроклимат.....78
4.1.4 Психофизиологические факторы.....79
4.1.5 Радиационная безопасность.....80
4.1.6 Правила обращения с жидким азотом.....81
4.1.7 Пожаро- и взрывобезопасность.....82
4.1.8 Электробезопасность.....83
4.2 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях.....84
4.3 Выводы по разделу.....86

Conclusion.....87

References.....89

Приложение А.....97

Приложение Б.....98

Introduction

Alpha-spectrometry is one of the most common methods for the qualitative and quantitative analysis of samples containing alpha-active isotopes. There are many different tools used to detect alpha radiation and determine its energy. However, despite the wide variety of alpha-spectrometers, the generally accepted standard for alpha spectrometric analysis is the use of semiconductor alpha detectors. Since the energies of alpha particles formed during the radioactive decay can differ by only 10–20 keV, it becomes impossible to distinguish them in spectra obtained with insufficient energy resolution. For this reason, semiconductor detectors occupy such a high position due to their low time and energy resolution. And yet, in some situations, energy resolution of semiconductor detectors is also insufficient.

Thus, the relevance of this work is determined by the need to obtain the best possible resolution of alpha spectra for more accurate analyses. The use of collimators is a promising tool to solve this problem. Over the years a number of researches have studied the effect of various collimator cell sizes on energy resolution and counting efficiency. But little attention has been given to both theoretical and experimental studies of cell shapes and sizes and their influence on alpha detector's performance.

The purpose of this study is to investigate and optimize counting efficiency and energy resolution of alpha spectrometric measurements varying collimator parameters.

According to the purpose, the following objectives are necessary to achieve:

1. To review basics of alpha detection physics and compare alpha spectrometry instrumentation.
2. To review results of previous researches of honeycomb collimator influence on energy resolution and counting efficiency.

3. To measure energy resolution and counting efficiency of reference alpha sources, varying collimator cell shape and size.

4. To develop a mathematical model with the same measurement geometry.

5. To simulate spectra of reference alpha sources, varying collimator cell shape and size, but also collimator height and material.

6. To determine optimal parameters of honeycomb collimator for particular measurement geometry.

1 Literature review

1.1 Alpha spectrometry

Alpha spectrometry is a widely used method to provide analysis of samples containing alpha-active isotopes. They may include both natural sources (the most common is radon and its decay products) and human-induced transuranium elements. The efficiency of alpha spectrometers is generally higher than that of gamma ray spectrometers, and the detection limit is lower.

1.1.1 Alpha detection physics

There are two principles for measuring the energy of alpha particles: magnetic and ionization. The first one is based on the analysis of the particle trajectory in a magnetic field, and the second one is based on its ionizing effect [1]. Magnetic method to measure the particle energy based on the unambiguous relationship between the momentum p of a particle and the radius R of the particle track in a perpendicular magnetic field:

$$p = zeBR \cdot sin(\alpha), \tag{1.1}$$

where: z is the atomic number of a particle (for alpha particles $z = 2$);

e is the elementary charge;

B is magnitude of magnetic inductance vector;

α is angle between magnetic inductance vector and velocity vector.

The major energy loss mechanism for charged particles is ionization deceleration. It represents a process in which the kinetic energy of a particle is converted into the energy of excitation and ionization of the medium's atoms. The formula for the ionization loss of heavy charged particles is as follows [2]:

$$\left(-\frac{dT}{dx}\right)_{ion} = \frac{4\pi n^6 Z^6 z^2}{m_e v^2}\left[ln\left(\frac{2 m_e v^2}{J}\right) - ln\left(1-\beta^2\right) - \beta^2\right] = \varphi(T), \tag{1.2}$$

where n is concentration of absorbing material atoms;

Z is the atomic number of atoms of absorbing material atoms;

m_e is the electronic mass;

v is velocity of a particle;

$J = 13.5\,Z$ eV is average ionization potential of absorbing material atoms;

$\beta = v/c$;

$\varphi(T)$ is a function depending on the kinetic energy of particles.

$\varphi(T)$ was introduced on the basis that for particles of a known mass, their velocity can be unambiguously recalculated into kinetic energy.

It can be seen from expression (2) that the ionization losses have a strong dependence on atomic numbers of both the atoms of the absorbing material and the particle. By integrating expression (2) for particles of a given charge with respect to energy, the range can be obtain. In terms of particle transport, range represents the path that a particle will travel in a medium until its initial kinetic energy T_0 equals the energy of the thermal motion of same particles (due to the smallness of this energy, the lower limit of integration is taken to be 0):

$$R = \int_0^{T_0} \frac{dT}{\varphi(T)}. \tag{1.3}$$

Whereas $\varphi(T) \sim nZ$, the greater Z of the medium is, the smaller the particle range is in this medium. It can be confirmed by Table 1.1, which lists the ranges of alpha particles for air, biological tissue, and aluminum.

Table 1.1 – Alpha particle ranges in several materials [3]

Energy of alpha particle, MeV	4	6	8	10
R in air, cm	2.5	4.6	7.4	10.6
R in biological tissue, μm	31	56	96	130
R in aluminum, μm	16	30	48	69

The small range of alpha particles in solids determines the features of their detection and, consequently, determines the design of alpha spectrometers and the shape of the measured samples. If the alpha-active layer is too thick, the self-

absorption losses and the inaccuracy associated with them will be too large. Figure 1.1 shows the shape of the alpha source spectra for different ratios h/R_0, where h is the thickness of the alpha-active layer, and R_0 is the range of alpha particles of energy E_0 in the active layer material. It can be seen that with an increase in this parameter, the intrinsic full width at half maximum (FWHM) of the line also increases, which leads to a deterioration in the energy resolution of the spectrum.

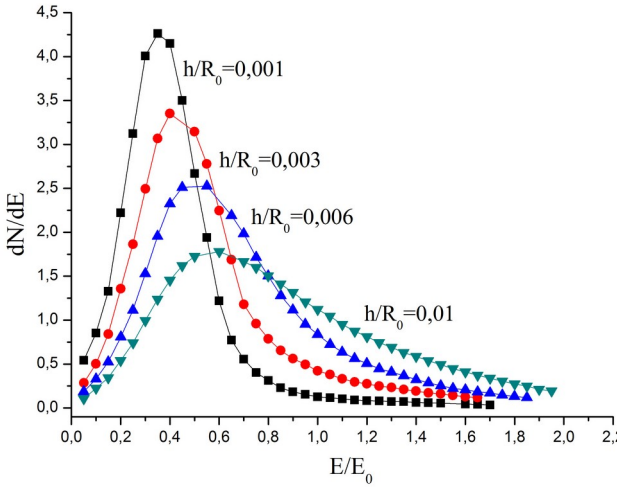


Figure 1.1 – Theoretical shape of the spectrum obtained from alpha source of different height h [4]

During measurements, the sample should be placed either directly inside the sensitive volume, or as close as possible to the detector. Also it should not be separated from the detector by thick partitions [1].

1.1.2 Alpha-spectrometry instruments

In alpha spectrometers, which are based on the magnetic principle of particle energy measurement (magnetic alpha spectrometers), particles passing through a perpendicular magnetic field are focused on different areas of the collector usually represented by photographic plates. Tracks are counted under a microscope, and the energy of registered particles is determined based on the position of the tracks. Magnetic spectrometers have the best energy resolution, but limited usage due to

high cost and large size. They are used mainly in fundamental science for recording cosmic radiation [1].

Spectrometers operating due to the ionization process are much more widespread. Among the detectors working in the spectral mode, four types can be distinguished:

– pulsed ionization chambers;
– fluorescent nuclear track detectors (FNTD);
– alpha sensitive scintillators;
– surface barrier silicon (SBS) detectors and passivated implanted planar silicon (PIPS) detectors.

The pulsed ionization chamber represents a closed volume with two electrodes with a certain operating voltage U_0 is applied. The volume is filled with gas, mostly inert (often argon or xenon), with various additives increasing the counting efficiency.

The interaction of alpha particles with gas molecules leads to the formation of ions. Therefore, ion and electrons are attracted to the electrodes. It generates a current pulse in the external circuit and, as a result, a voltage change on the equivalent capacitance C (Figure 1.2). Unlike proportional counters and Geiger counters, there is no gas amplification in ionization chambers, so the output signal is quite small in magnitude.

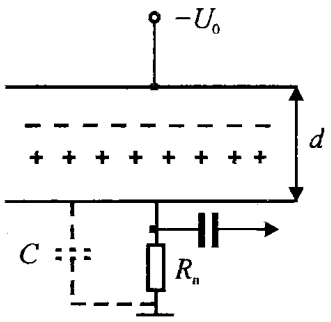


Figure 1.2 – Connection diagram of a flat ionization chamber in a pulse mode [5]

Ionization chambers may have various configurations. Whether or no, their design often provides for the placement of the test sample directly into the

sensitive volume of the detector. It helps to increase the efficiency of particle detection. However, the requirement to refill the detector with a highly purified gas mixture is associated with a number of difficulties; there is a need to degas the working volume, to maintain its tightness, and carry out a thorough preliminary gas cleaning.

These problems can be avoided by using refillable proportional counters, where the necessary purity of the gas mixture is maintained by continuous gas supply during measurements. Due to the increased pressure in the counter, absolute tightness of the working chamber is not required [1].

The time resolution of pulsed ionization chambers and proportional counters depends directly on the charge collection time, which usually varies in the range from 1 to 10 ms. Thus, the use of ionization chambers to measure the spectra of high-activity sources is impossible; however, for sources with low activity their use is quite common [4].

In addition, ionization chambers have one more significant drawback; high-energy particles are not strongly decelerated in the sensitive volume of the detector, so that a complete absorption peak is not formed. Also, the energy resolution of ionization chambers is very mediocre, which limits the scope of their application as instruments for the analysis of nuclear materials.

Alpha spectrometry by FNTD is not widespread, but has potential applications in the particle energy region above the sensitivity range of ionization chambers. Such detectors are based on aluminum oxide crystals doped with carbon and magnesium (Al_2O_3: C, Mg) as a material for photographic plates. Tracks are analyzed by structural illumination microscopy (SIM) or confocal laser scanning microscopy (CLSM). The energy of alpha particles is determined by the length, direction and intensity of the received tracks [6].

The field of FNTD spectrometry applications has not been fully defined yet, but studies [7] in this area tend to believe that it will have a high applied potential in nuclear medicine.

Standard scintillation alpha spectrometers use silver-activated zinc sulfide ZnS(Ag) as the detector material. This scintillator characteristically exhibits a high light output (the number of photons emitted by the material per unit of absorbed energy). The light yield of ZnS(Ag) is about 250–300% compared to NaI(Tl) [1].

The time resolution of scintillation spectrometers is determined by the glow time of the scintillator, i.e. a time period when the energy of an absorbed particle is converted into light. ZnS(Ag) is characterized by a rather mediocre glow time of the order of 1 μs among widely used scintillators. Nevertheless, in comparison with gas-filled detectors (ionization chambers and proportional counters), alpha scintillation spectrometer can operate at a much higher load, which is its undoubted advantage.

The main disadvantage of ZnS(Ag) is the impossibility of growing large single crystals; therefore, as a rule, such detectors are made by depositing a fine-crystalline powder on a substrate. A thickness of the powder should be comparable with the maximum range of alpha particles in ZnS. It leads to a deterioration in the energy resolution of the detector, since in comparison with a single crystal, self-absorption losses in fine-crystalline powder are higher [1].

The use of semiconductor alpha spectrometers is currently the accepted standard for alpha analysis. The most common among devices of this class are spectrometers based on SBS detectors. The schematic structure of such detector is revealed in Figure 1.3.

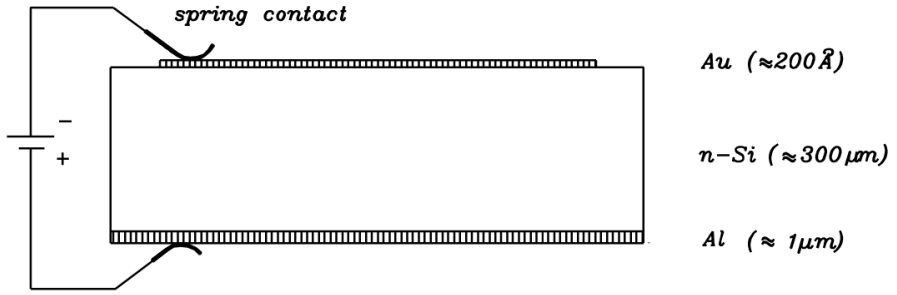


Figure 1.3 – Schematic structure of SBS [8]

The fabrication processing of SBS consists of the following stages. Firstly, a thin gold layer about 20 nm in thickness is deposited on a silicon substrate (made of n-type silicon). Obtaining such a thin coating is carried out due to the evaporation of gold. The back side of the substrate is sputtered with aluminum, which layer is of the order of 1 μm [8]. The resulting structure is called the input window.

The maximum thickness of the sensitive area (depletion zone) of SBS detectors can be up to 5 mm. This value is enough to stop alpha particles with energies up to 120 MeV. However, typical silicon detectors used in alpha spectrometry have a depletion region thickness of 300 mm and a sensitive area of 300 mm^2. They have an FWHM of about 20 keV and a time resolution of 10^{-8} s, which significantly exceeds parameters of all previously considered detectors [9].

An analogue of SBS detectors is PIPS. The main difference between PIPS and SBS detectors lies in the manufacturing technology. Since processing features, it is possible to create an entrance window of much smaller thickness in order to reduce the energy loss of incident alpha particles, which have an acute angle with detector [1, 4].

The general scheme of a semiconductor alpha spectrometer is shown in Figure 1.4.

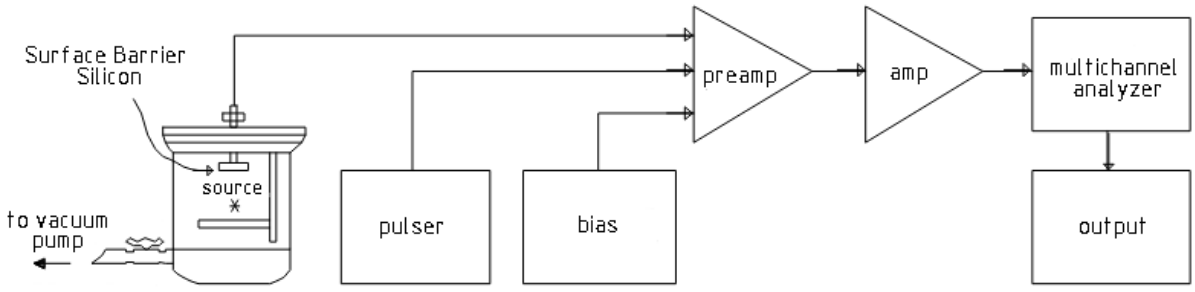


Figure 1.4 – Block diagram of a semiconductor alpha spectrometer

The radiation source is placed in the measuring chamber in proximity to the detector. The measuring chamber has an outlet to a vacuum pump. During

measurements, the signal from the detector is sent to the preamplifier and amplifier, where it acquires a suitable form for reading by the measuring equipment. In a multichannel analyzer, pulses from the detector are sorted by their energy (magnificence of voltage pulse). Then the resulting distribution is displayed as a spectrum available for processing and analysis.

Air pumping is necessary because of the high attenuation level of alpha radiation in the air (Table 1.1). In the absence of vacuum, the energy loss of alpha particles is about 1 keV/cm for every 100 Pa [9].

1.1.3 Detection efficiency

Detection efficiency (or counting efficiency) is an intrinsic property of detector. It can be interpreted as a probability to detect an ionizing particle by certain detection equipment in certain geometry. For convenience, it is subdivided into two categories: absolute and intrinsic efficiencies.

Absolute efficiency ε_{abs} is defined as number of pulses generated by ionizing radiation in detector N_{rec} divided on number of particles emitted by radiation source N_{em}:

$$\varepsilon_{\text{abs}} = \frac{N_{rec}}{N_{em}}, \tag{1.4}$$

To exclude as much as possible the dependence on geometry aspects, intrinsic efficiency ε_{int} is used. It is defined as:

$$\varepsilon_{\text{int}} = \frac{N_{rec}}{N_{inc}}, \tag{1.5}$$

where N_{inc} is the number of particles incident on detector.

Intrinsic efficiency is influenced primarily by the detector material, thickness of the sensitive volume of it and radiation energy. It is said that the efficiency of a SBS detectors can assume a value up to 25–40% [11], but in case of alpha particles it strongly depends on measurement conditions.

A relation of two efficiencies is the following:

$$\varepsilon_{\text{int}} = \varepsilon_{\text{abs}} \frac{4\pi}{\Omega}, \tag{1.6}$$

where Ω is solid angle of detector seen from the actual source position.

In spectrometric measurements, absolute counting efficiency in region of certain energy E of calibration radioactive source is determined by the equation:

$$\varepsilon_{\text{abs}}(E) = \frac{S}{\eta A t}\ e^{-\lambda t}, \tag{1.7}$$

where: S is the area of the intensity peak with the average energy E;

η is the branching ratio (yield) of the radionuclide at the energy E;

A is the reference activity of the source;

t is the live time of the measurement;

λ is decay constant of the radionuclide.

1.1.4 Energy resolution of alpha spectra

Another important characteristic of a ionizing radiation spectrometer is energy resolution. It describes the ability of the detector to distinguish particles of almost similar energies and takes on great significance for obtaining accurate results.

An intensity peak obtained by spectrometric measurement always has a certain distribution called the detector response function. Figure 1.5 shows the response function, which has a normal distribution form.

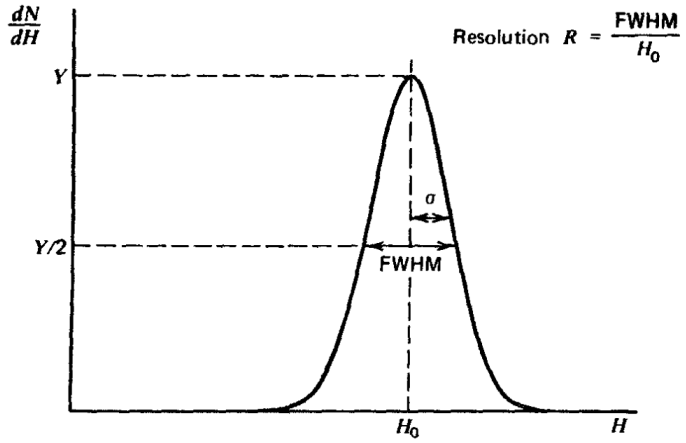


Figure 1.5 – Schematic detector response function [10]

In most cases, energy resolution is determined in two ways: either through the FWHM value, or through the ratio of the FWHM to the value of the peak centroid H_0 (measured in channels or eV). For peaks that have the form of a Gaussian distribution, the value of FWHM is calculated by the following equation:

$$FWHM = 2\,\sigma\sqrt{2\,ln(2)} \approx 2.35\,\sigma, \tag{1.8}$$

where σ is the dispersion of the pulse number [10].

Based on these considerations, the limiting value of $FWHM_{h-e}$ can be found. $FWHM_{h-e}$ value is described only by statistical fluctuations in the number of charge carriers produced in the detector:

$$FWHM_{h-e} \approx 2.35\,E\sqrt{\frac{F}{N}} = 2.35\sqrt{F\,\omega E}, \tag{1.9}$$

where: F is Fano factor (for Si 0.128 ± 0.001 [11]);

E is the energy of ionizing particle;

N is the number of generated charge carriers;

ω is the energy spent to generate a hole-electron pair (for Si 3.650 ± 0.009 eV [12]).

The Fano factor expresses a similarity measure of the distribution of interest with the Gaussian distribution. Its presence formula (1.9) is caused by the consideration that the number of charge carriers generated by particle collisions can be described with not the normal distribution, but the Poisson distribution.

Regardless, the value of R is usually several times less than the real energy resolution, since many factors affect the resolution of the detector. These factors are the noise level, the source thickness, the distance between the detector and the source, the input window thickness, et cetera [1, 4].

Nevertheless, while creating mathematical models of the response of a semiconductor detector, it is more convenient to take into consideration the main three: statistical uncertainty ($FWHM_{h-e}$), noise level ($FWHM_{noise}$) and losses due to ionization and excitation of electrons ($FWHM_{ex\text{-}ion}$). Thus, the total value of the FWHM will have the following structure [13]:

$$FWHM^2 = FWHM^2_{h-e} + FWHM^2_{noise} + FWHM^2_{ex-ion}, \quad (1.10)$$

$FWHM_{noise}$ value for a particular semiconductor detector can be measured using the built-in pulse generator. On the other hand, obtaining a reliable value of $FWHM_{ex\text{-}ion}$ is associated with some difficulties.

After entering the active zone of the detector, the particles lose their energy due to ionization and excitation processes with Si electrons. The remaining energy is spent in collisions with Si atoms by so-called "nuclear stopping power". Energy losses during ionization and excitation processes do not follow a Gauss distribution and contribute essentially to the asymmetry of the alpha peaks [14]. For this reason, the most common way to take it into account is the use of simulation methods [13].

In addition to all of the above, peaks of alpha radiation have a characteristic tailing in the region of lower energies (Figure 1.6), which affects the energy resolution of the resulting peak.

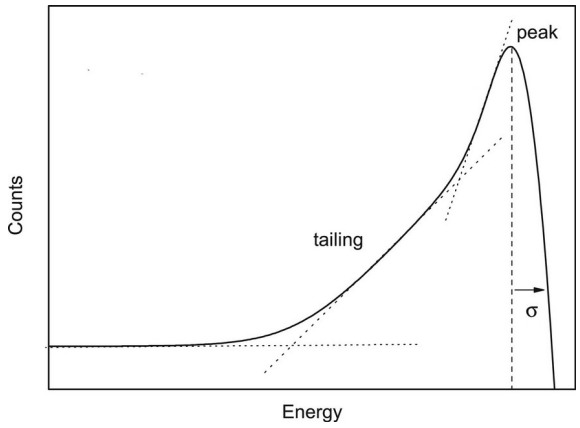


Figure 1.6 – Schematic graph of an alpha peak with tailing [15]

The main reason for the tailing formation is the following. Alpha particles with an angle distribution other than 90° travel a much longer path to the detector than particles flying perpendicular to its surface. So, in the first case compared to the second, the energy loss increases and interactions of low-energy particles affect the peak shape. An additional contribution to the peak asymmetry is made by the nature of the interaction of alpha particles with the sensitive volume of the

detector. The distribution of energy losses during ionization also shows a low-energy tailing.

However, for some radioactive isotopes, the effects of the high-energy tailing can be observed. An example is the lines of ^{212}Po and ^{213}Po in radioactive equilibrium with ^{212}Bi and ^{213}Bi. The formation of tailing in this case is caused by the interaction of beta particles, formed during the Bi decay, and alpha particles, formed during the Po decay, with the sensitive volume of the detector during signal processing [15]. However, the low-energy tailing appears to be the most common asymmetry effect.

Tailing is significant for alpha peaks with relatively low energies (up to 6 MeV) and often becomes a critical obstacle to accurate spectral analysis. This effect is especially substantial for multiplets, where the higher energy peak is much more intense than the peak with a lower energy.

Improving the energy resolution of a spectrometer is one of the priority problems of alpha spectrometry. Fair amount of tools is used to solve it and one of them is the use of collimators.

1.2 Collimation of alpha radiation

Collimation is an old technique to alleviate various measurement problems in spectrometry of ionizing radiation. Collimators are divided into two types by mechanism of their action: mechanical and electronic.

Electronic collimation is implemented in ionizing chambers by decelerating charged particles of certain angles by voltage pulses. However, to apply this method, detector signal should depend on incidence angle. For this reason, application of electronic collimation in semiconductor detector, such as PIPS, is impossible [16].

Mechanical collimators allow to cut off particles with angles significantly lower than 90° directly by absorption, as it showed at Figure 1.7. Thus, the number of particles interacting with the detector at an acute angle is reduced. It leads to a

decrease in the tailing intensity and slightly improves the energy resolution of the peak [17].

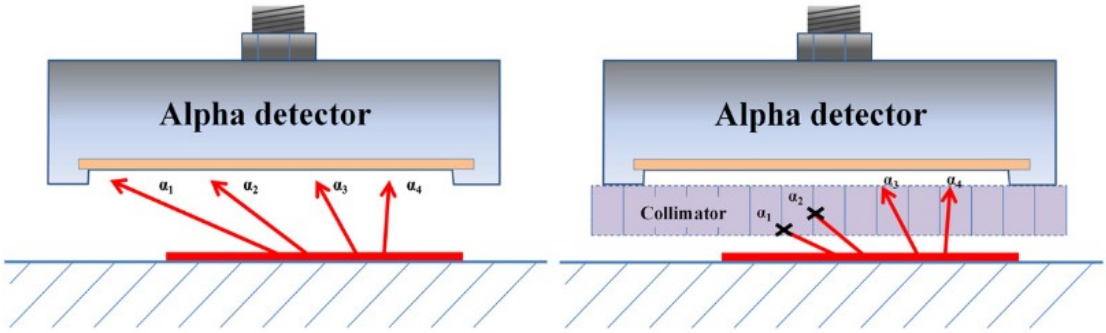


Figure 1.7 – Schematic representation of mechanical collimation of alpha particles [17]

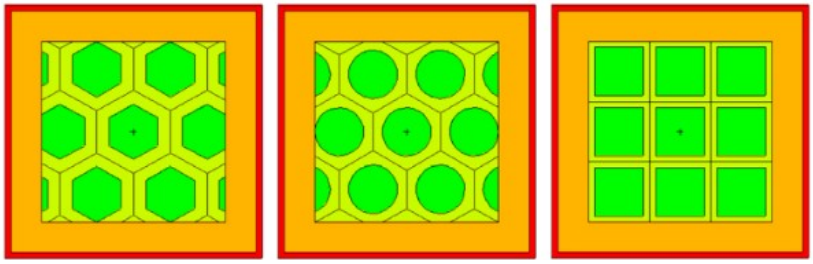
In contradistinction from gamma radiation measurements, single hole collimators are not used in alpha spectrometry because of considerably lower detection efficiency. On account of small ranges of alpha particles in any solid material, the most convenient collimator shape is honeycomb. Particles with low angles (such as α_1 and α_2 at Figure 1.7) can be stopped by thin cell walls, while particles with normal incidence or close to it (such as α_3 and α_4) pass through and interact with the detector.

According to shape of honeycomb collimator, it is necessary to take into account new important parameter as cell diameter or mesh thickness. In case if cell size is too small, alpha particles emitted almost perpendicularly, but close to the cell wall might be absorbed and do not enter the detector, decreasing the efficiency. On the other hand, the larger the size, the greater the scatter of incident angles, which leads to poor energy resolution [17].

1.2.1 Collimators and energy resolution of alpha spectra

In recent years, numerous studies are underway on sizes and shapes of collimator cells in alpha measurements with semiconductor spectrometers. Both mathematical models and experimental methods are applied.

Previous researches have focused on three cell shapes: hexagonal, circular and rectangular (as depicted at Figure 1.8, where holes are green and walls are yellow).



a) b) c)

Figure 1.8 – Collimator meshes with different cell shapes [18]:
a) hexagonal; b) circular; c) rectangular

The main differences between these shapes that supposed to affect energy resolution and counting efficiency are claimed to be the following [19].

1. Circular mesh has extra intercellular space filled with material and does not give complete surface coverage. Particles get absorbed more likely, so the detection efficiency might be decreased.

2. Rectangular and hexagonal cells with the same areas have different perimeters, and hexagon has shorter one, according to the expression (1.11). Shorter perimeter reduce the probability of particle to encounter the walls, hence, might improve counting efficiency.

$$\frac{P_{\text{rec}}}{P_{\text{hex}}} = \frac{4 \cdot \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{2}} \cdot r}{6 \cdot r} = \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{3}} \approx 1.075\,, \tag{1.11}$$

where P_{rec} is a perimeter of rectangular cell;

P_{hex} is a perimeter of hexagonal cell;

r is radius of the circumscribed circle of a hexagonal cell.

Theoretical study [18] was made of the influence of the cell shape and diameter on the energy resolution and efficiency of alphas with energies from 5 to 9 MeV. It has been established that the dependence of the resolution on the cell

shape is extremely weak (within the limit of error), but there are differences in the particle detection efficiency: for a circular collimator it turned out to be the smallest (0.922%), and for a rectangular collimator it turned out to be the largest (1.31%).

In regard to cell size, minimal energy resolution and efficiency were shown by a 14 mm mesh for all shapes. Furthermore, some diameter values were found, where both energy resolution and counting efficiency deteriorate.

It is important to mention, that most of studies are focused on hexagonal cell shape due to its shortest perimeter. For example, research [16] takes both theoretical and experimental approach to to investigate changes in energy resolution and efficiency caused by hexagonal collimators, varying mesh size. Collimator material is aluminum and cell diameters (which is diameter of inscribed circle of hexagon) were varied between 2.5, 4 and 6 mm. Number of alpha sources were used, providing particle energies from 4 to 6 MeV.

According to the Geant4 simulation results, a significant improvement in energy resolution was noted when using a collimator (Figure 1.9).

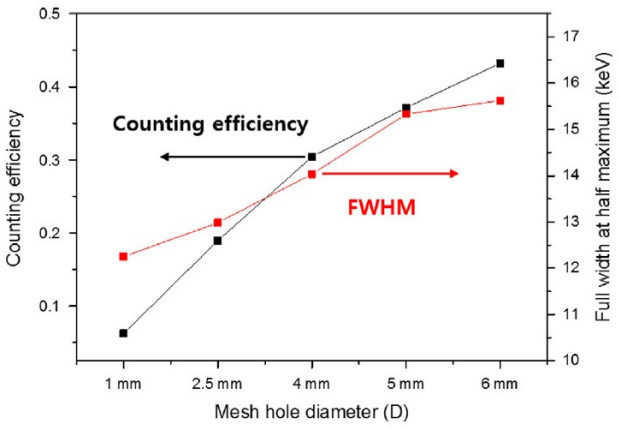
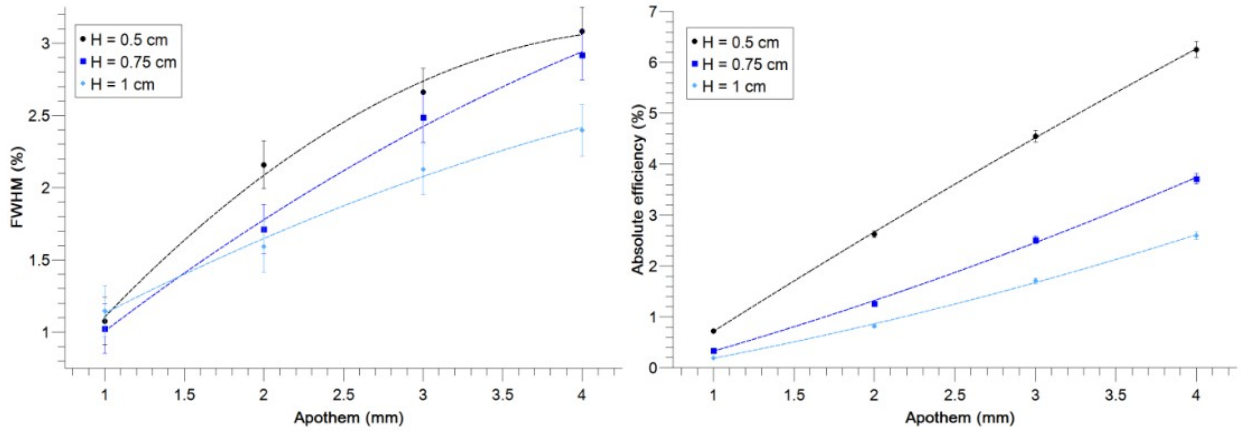


Figure 1.9 – Theoretical curve of efficiency and FWHM with respect to cell diameter of hexagonal collimator [16]

However, there is a decrease in efficiency as in FWHM. At the same time, when the difference between the energy peaks is less than 10 keV, they cannot be distinguished even with the use of a collimator.

The experimentally obtained spectra also showed a significant improvement in the energy resolution of the peaks and a decrease in the intensity of the tailing. Nonetheless, the obtained resolution turned out to be higher than expected, which could be explained by the non-homogeneity of the PIPS detector doping.

In study [19], the hexagonal collimators are also chosen. Collimator material is stainless steel and particle energies are in range from 5 to 6 MeV. Simulation results are revealed in Figure 1.10. It is important to note, that apothem used in this study to describe hexagonal cell size is nothing but a half of mesh step (diameter of inscribed circle).



a) b)

Figure 1.10 – Theoretical evolutions of FWHM (a) and absolute efficiency (b) with respect to hexagonal mesh size and collimator height *H* [19]

Figure 1.10 shows, that not only cell diameter has an influence on energy resolution and efficiency, as at Figure 1.9, but also height of a collimator. Significant decrease can be seen for both quantities with rising collimator height, especially in the case of efficiency.

Research [20] studies the influence of the collimator position relative to the source and detector (Figure 1.11) on the efficiency of particle detection. Study shows that an increase in the source diameter L from 1 to 20 cm with a constant value of the source distance R_1 = 1 cm leads to a linear increase in the counting efficiency, however, with a further increase from 50 to 100 cm, the linearity is lost.

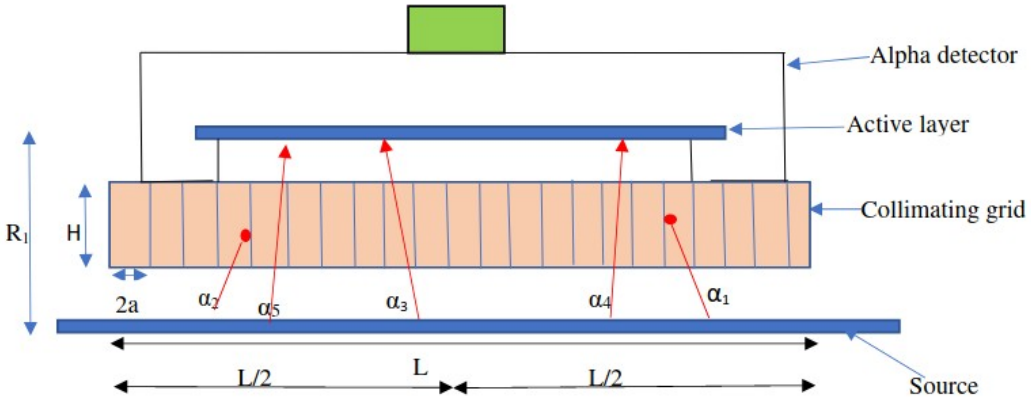


Figure 1.11 – Diagram showing the source position [20]

By keeping L constant (10 cm) and varying R_1 from 1 to 100 cm, the efficiency also decreases. The most significant decrease is observed in the range of R_1 from 1 to 5 cm, where the efficiency drops from 0.45 to 0.25.

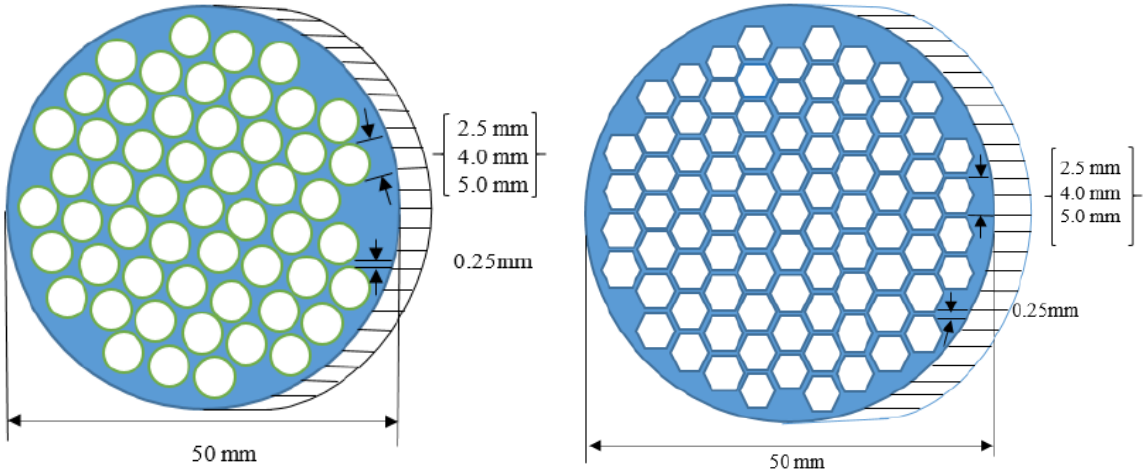
Additionally, the applicability of collimators for measuring spectra of alpha-emitting aerosols was studied in [21]. Acrylonitrile butadiene styrene collimators with a square cell of various sizes were used in the experiments. In this case, as in previously mentioned studies, an improvement in the energy resolution (from 400 to 120 keV) was revealed, accompanied by a decrease in efficiency. The study also noted that the analysis of the energy spectrum in case of an aerosol source is significantly complicated with self-absorption in the filter, which leads to a strong shift of the peaks.

Thus to summarize, considerable attention has been paid to the research of collimation effects on energy resolution and counting efficiency. The main trends and dependencies are clear; smaller cell size leads to better energy resolution (decrease of FWHM) and worse efficiency due to increased probability of alpha-particles to collide with cell walls. However, differences between cell shapes were primarily theoretically investigated and still remain questionable.

2 Investigation of the collimator influence on counting efficiency and energy resolution

2.1 Materials and methods

In the present work honeycomb collimators with hexagonal and circular cell shape is used. All collimators are made of Anycubic ultraviolet-curing resin (UV-resin) by 3D printing. The diameters of both circular and hexagonal cells have values of 2.5, 4.0 and 5.0 mm, as shown at Figure 2.1. Diameter of hexagonal cell is defined as diameter of inscribed circle. For all measurements collimator height equals 5.0 mm.



a) b)

Figure 2.1 – Schematic diagram of a) circular and b) hexagonal collimator

Measurement of efficiency and energy resolution is focused on ^{238}Pu and ^{241}Am lines. Reference spectroscopic alpha sources of ^{238}Pu and ^{241}Am has circular active layer with diameter of 11 mm and 1 mm thick. TiO_2 coating covers active layer and is 0.08 μm in thickness and 24 mm in diameter. Source characteristics are presented in Table 2.1.

Table 2.1 – Characteristics of ^{238}Pu and ^{241}Am sources

Source	Declared activity, Bq	Alpha particle energy, keV	Yield, %
^{238}Pu (P8-532)	18 360	5499.0	70.91
		5456.3	29.98
^{241}Am (A1-86)	17 500	5485.6	84.8
		5442.8	13.1

Spectrometric measurements are provided with Canberra PIPS alpha spectrometer system (model A450 – 18AM). Scheme of a measuring chamber is depicted at Figure 2.2. Detector is placed 3 mm from the collimator and 9 mm from the source. The vacuum pressure in the chamber (about 8 Pa) was obtained with a rotary pump attached. Time of the measurement adjusted to 300 sec.

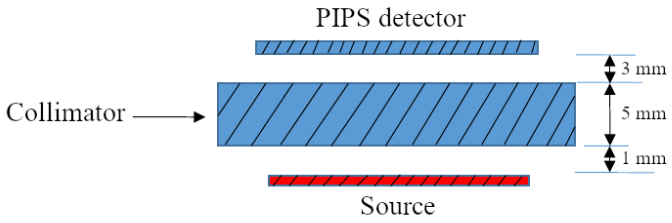


Figure 2.2 – Schematic diagram of measurement geometry

Peak areas and FWHM values are obtained using Genie 2000 software. Absolute efficiency ε is calculated from obtained area values S according to the modified expression (1.7), neglecting exponential part with regard to the long half-life of ^{238}Pu and ^{241}Am:

$$\varepsilon = \frac{S}{\eta A t}. \tag{2.1}$$

2.2 Simulation in Geant4

Geant4 is an open source toolkit for Monte Carlo simulations using Object-Oriented paradigm provided by C++ programming language. It allows to handle

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А91	Котляревской Анне Сергеевне

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

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
− *Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих*	Бюджет проекта – не более 362 тыс. руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 186 тыс. руб.
− *Нормы и нормативы расходования ресурсов*	Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 3,5 баллов из 5
− *Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования*	Тариф отчислений во внебюджетные фонды (страховых взносов) – 30%
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. *Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения*	Анализ коммерческого потенциала исследования. Исследование конкурентных технических решений. Проведение SWOT-анализа
2. *Планирование и формирование бюджета научных исследований*	Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения научного исследования. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта
3. *Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования*	Проведение оценки сравнительной эффективности проекта
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей)***:**	
1. *Карта сегментации рынка* 2. *Оценка конкурентоспособности технических решений* 3. *Матрица SWOT* 4. *Альтернативы проведения НИ* 5. *Календарный график проведения* 6. *Бюджет НИ* 7. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ*	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.04.2023

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А91	Котляревская Анна Сергеевна		

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» заключается в проектировании и создании конкурентоспособной разработки, отвечающей современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Её достижение обеспечивается решением ряда задач:

1) проведение оценки коммерческого потенциала и перспективности научных исследований;

2) определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;

3) планирование научно-исследовательских работ;

4) определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

3.1 Оценка коммерческого потенциала научного исследования

Как уже было упомянуто в разделе 1.2, в области спектрометрических измерений применяется два типа коллиматоров, различающихся по принципу действия: механические и электронные. Наиболее важными параметрами, определяющими область применения коллиматора того или иного типа, являются тип коллимируемого излучения и тип детектора, установленного в спектрометрической установке (рассмотрены только детекторы, работающие на принципе ионизации). В таблице 3.1 приведена карта сегментирования рынка коллиматоров в соответствии с упомянутыми параметрами.

Таблица 3.1 – Карта сегментации рынка коллиматоров для спектрометрических систем

		Тип коллимируемого излучения		
		Альфа	Бета	Гамма
Тип дектектора	Газоразрядный			
	Сцинтилляционный			
	Флуоресцентный трековый			
	Полупроводниковый			

– механические коллиматоры – электронные коллиматоры

Как можно отметить из таблицы 3.1, значительная часть рынка захвачена механическими коллиматорами по причине их простоты и универсальности. Тем не менее, механические коллиматоры значительно снижают эффективность регистрации ионизирующего излучения детектором, поэтому так важен подбор оптимальных параметров коллиматора для конкретных задач спектрометрии.

Также стоит упомянуть, что промышленное изготовление ячеистых коллиматоров альфа-излучения, к которым приковано пристальное внимание научного сообщества, в России отсутствует.

3.1.1 Портрет потенциальных потребителей результатов исследования

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. В рассматриваемом случае в

качестве конкурирующих разработок выбраны различные виды коллиматоров альфа частиц:

1) механический ячеистый коллиматор (применяется в данном исследовании);

2) механический коллиматор с одним отверстием;

3) электронный коллиматор.

Основные преимущества ячеистого коллиматора над коллиматором с одним отверстием является гораздо меньшее снижение эффективности счёта детектора, что позволяет измерять менее активные источники. Но при этом, за счёт своей сложной структуры и тонких стенок, такие коллиматоры менее надёжны и легче повреждаемы, особенно если сделаны из неплотных материалов (например, пластик).

Электронные коллиматоры функционируют по совершенно иному принципу и за счёт этого сильно ограничены в области применения. Они более сложны в устройстве и установке на спектрометр и, соответственно, более дорогостоящие.

Позиция разработки с точки зрения конкурентных преимуществ над другими оценивается по каждому из заранее определённых показателей экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 означает наиболее слабую позицию, а 5 – наиболее сильную.

Балльная оценка конкурентоспособности вычисляется по следующей формуле:

$$К = \sum В_i \cdot Б_i \qquad (3.1)$$

где $В_i$ – вес *i*-го критерия;

$Б_i$ – балльная оценка *i*-го критерия.

Оценочная карта приведена в таблице 3.2, при этом индексы балльных оценок соответствуют порядковому номеру разработки в вышеуказанном списке.

Таблица 3.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес крите-рия	Баллы			Конкуренто-способность		
		$Б_1$	$Б_2$	$Б_3$	$К_1$	$К_2$	$К_3$
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Применимость для различных типов спектрометров	0,08	4	4	1	0,32	0,32	0,08
Надёжность	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
Функциональность (соответствие требованиям потребителей)	0,35	4	1	5	1,4	0,25	1,75
Простота эксплуатации	0,02	5	5	3	0,1	0,1	0,06
Экономические критерии эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,08	3	1	4	0,24	0,08	0,32
Уровень проникновения на рынок	0,12	1	1	3	0,12	0,12	0,36
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	3	5	3	0,3	0,5	0,3
Цена	0,2	4	5	2	0,8	1	0,4
Итого	**1**	28	27	26	**3,48**	**2,62**	**3,42**

Таким образом, сотовидные коллиматоры являются наиболее конкурентоспособным техническим решением среди рассмотренных.

3.1.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ является инструментом для комплексного исследования внешней и внутренней среды научно-исследовательского проекта. В ходе анализа определяются сильные и слабые стороны проекта, то есть, конкурентные преимущества и недостатки или особые ресурсы, обусловленные внутренней средой проекта. Также определяются

возможности и угрозы, обусловленные изменением внешними условиями, в которых существует проект.

Результаты *SWOT*-анализа приведены в таблице Б1 в приложении Б. По результатам анализа можно выделить основные направления дальнейшего развития научно-исследовательского проекта:

1) уточнение математической модели путём введения дополнительных поправок и усовершенствования геометрии измерения;
2) ускорение вычислений путём внедрения многопоточности;
3) создание опытных образцов коллиматоров из металла или композитного пластика.

3.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Основная проблема настоящей работы заключена в потребности подбора оптимальных параметров коллиматора для проведения спектрометрических измерений альфа-излучающих изотопов. По этой причине единственный параметр, по которому может быть проведено разделение альтернатив проведения данного исследования – это его метод.

В данном случае методы проведения исследования можно дифференцировать на экспериментальные и теоретические. Экспериментальный метод подразумевает изготовление образцов коллиматоров с различными геометрическими параметрами и из разных материалов. В свою очередь, теоретический метод основан на создании математической модели, которая должна быть верифицирована несколькими сериями экспериментов, но не требует изготовления большого количества образцов.

Основными задачами математической модели являются расчёт энергетических потерь альфа-частиц в воздухе и построение энергетического спектра. Они могут быть решены с использованием как имитационной

модели, так и аналитической (пусть и со значительно меньшей точностью результатов). Единственным доступным программным продуктом для построения имитационной модели на настоящий момент является Geant4. Для построения аналитической модели подойдёт практически любой программный пакет компьютерной алгебры, но из приоритетных можно выделить MatLab.

Главные особенности каждой из упомянутых альтернатив, на которых основаны дальнейшие расчёты, приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Альтернативы проведения научного исследования

Критерий	Наименование альтернативы		
	Имитационная модель	Эксперимент	Аналитическая модель
Количество изготовленных образцов	6	42	6
Требуемое программное обеспечение (ПО)	*LibreOffice Calc, LibreOffice Writer, Geant4, Wolfram Mathematica*	*LibreOffice Calc, LibreOffice Writer*	*LibreOffice Calc, LibreOffice Writer, MatLab*
Наиболее продолжитель-ный вид деятельности	Проведение симуляций	Проведение измерений	Построение системы уравнений
Точность результата	Средняя	Высокая	Низкая

Реализованным методом проведения данного научного исследования является построение имитационной модели (далее исполнение 1). Полностью экспериментальное исследование в дальнейшем будет обозначаться исполнение 2, а исследование на основе аналитической модели – исполнение 3.

3.3 Планирование научно-исследовательских работ

Рабочую группу, вовлечённую в реализацию настоящего проекта, составляют два исполнителя: научный руководитель (доцент), научный сотрудник (аспирант) и инженер (студент). Между исполнителями

распределены активности, составляющие этапы реализации проекта. Перечень работ, разделённых между исполнителями, приведён в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания (ТЗ)	1. Составление и утверждение ТЗ	Руководитель
Выбор направления исследований	2. Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3. Выбор направления работ	Руководитель, инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	4. Подготовка к проведению измерений (3D-печать образцов)	Научный сотрудник
	5. Проведение экспериментов	Инженер
	6. Обработка результатов эксперимента	Инженер, научный сотрудник
	7. Проведение предварительных расчётов, составление математической модели	Инженер
	8. Корректировка математической модели	Инженер
Обобщение и оценка результатов	9. Оценка согласованности полученных результатов	Руководитель, инженер
	10. Проведение моделирования и обработка результатов	Инженер
Оформление отчётной документации	11. Составление отчётной документации (пояснительной записки)	Инженер
	12. Корректировка отчётной документации	Руководитель, Инженер

Для оценки трудоёмкости указанных работ используется величина ожидаемого значения трудоёмкости, которая вычисляется по следующей формуле:

$$t_{\text{ож}\,i} = \frac{3\,t_{min\,i} + 2\,t_{max\,i}}{5}, \tag{3.2}$$

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

$t_{min\,i}$ – минимально возможная трудоёмкость *i*-ой работы, чел.-дн.;

$t_{max\,i}$ – максимально возможная трудоёмкость *i*-ой работы, чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях $T_р$, учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{р\,i} = \frac{t_{ож\,i}}{Ч_i}, \tag{3.3}$$

где $T_{рi}$ – продолжительность *i*-ой работы, раб. дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих *i*-ую работу, чел.

Для удобства построения календарного графика-плана в виде диаграммы Ганта продолжительность работ переводится в календарные дни по формуле:

$$T_{к\,i} = T_{р\,i} \cdot k_{кал}, \tag{3.4}$$

где $T_{кi}$ – продолжительность *i*-ой работы, кал. дн.;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности, вычисляемый по формуле (3.5).

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1{,}22, \tag{3.5}$$

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

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

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения для каждого из трёх вариантов исполнения приведены в таблице Б2 в приложении Б. На основе данных из таблицы Б2 построен календарный план-график для исполнения 1 (таблица 3.5), разбитый на декады. Номера работ соответствуют таблице 3.4.

Таблица 3.5 – Календарный график проведения научного исследования

№ работ	Исполнители	T_{ki}, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
			янв	февраль			март			апрель			май	
			3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Руководитель	3												
2	Инженер	15												
3	Руководитель, инженер	1												
4	Научный сотрудник	3												
5	Инженер	5												
6	Инженер, научный сотрудник	2												
7	Инженер	9												
8	Инженер	32												
9	Руководитель, инженер	3												
10	Инженер	20												
11	Инженер	16												
12	Руководитель, Инженер	4												

– руководитель; – инженер; – научный сотрудник.

3.4 Бюджет научно-технического исследования

В процессе формирования бюджета исследования применяется группировка затрат по следующим статьям:

- материальные затраты;
- затраты на ПО;
- затраты на специальное оборудование;
- основная заработная плата исполнителей;

– дополнительная заработная плата исполнителей;

– отчисления во внебюджетные фонды;

– контрагентные расходы;

– накладные расходы.

3.4.1 Расчёт материальных затрат и затрат на ПО

Расчёт общих материальных затрат $З_м$ проводился с учётом транспортно-заготовительных расходов по следующей формуле:

$$З_м = (1 + k_T) \cdot Ц \cdot N, \quad (3.6)$$

где $k_T = 0{,}2$ – коэффициент учёта транспортно-заготовительных расходов;

Ц – цена за единицу материального ресурса;

N – количество материального ресурса.

Материальные затраты, необходимые для реализованного варианта исполнения, приведены в таблице 3.6. Исполнение 2 и 3 требуют идентичных расходов в данной статье, несмотря на то, что в исполнении 2 требуется печать 36 коллиматоров из фотополимерной смолы, минимального приобретаемого объёма смолы достаточно для их производства.

Таблица 3.6 – Материальные затраты

Наименование	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Затраты на материалы, руб.
Фотополимер *Anycubic Water-Wash Resin+*	1	4900	5880
Халат лабораторный	3	1160	4176
Итого			**10 056**

Затраты на ПО для каждого варианта реализации проекта рассчитаны на основе информации из таблицы 3.4. Поскольку все программные продукты *LibreOffice*, а также *Geant*4 распространяются бесплатно как ПО с

открытым исходным кодом, они не включены в перечень затрат (таблица 3.7). Затраты на *Wolfram Mathematica* и *MatLab* рассчитаны на основе стоимости подписки для академических целей, исходя из курса 1$ = 84 руб.

Таблица 3.7 – Затраты на ПО

Наименование	Длительность подписки			Цена за единицу, руб.			Затраты на ПО, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Wolfram Mathematica	3 мес.	–	–	5124	–	–	15372	–	–
MatLab	–	–	1 год	–	–	23100	–	–	23100
Итого							**15372**	**–**	**23100**

3.4.2 Расчёт затрат на специальное оборудование

Настоящее исследование не требует приобретения дополнительного специального оборудования, поэтому в затраты включены только амортизационные отчисления для оборудования, имеющегося в Томском политехническом университете (ТПУ). Также в затраты включена амортизация личного ноутбука исполнителя, на котором проводилось моделирование и обработка результатов.

Амортизационные отчисления $З_а$ определяются по формуле:

$$З_а = \frac{Ц \cdot t}{T \cdot 365}, \quad (3.7)$$

где Ц – цена за единицу оборудования;

t – длительность использования, дни;

T – срок полезного использования (СПИ), который определяется согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 01.01.2002 №1 «О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» [23].

Результаты расчёта затрат на оборудование приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Затраты на специальное оборудование

Наименование	Длительность использования, дни			СПИ, годы	Цена за единицу, руб.	Затраты на оборудование, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3			Исп.1	Исп.2	Исп.3
Альфа-спектрометр *Canberra A*450 – 18*AM*	7	50	7	5	10 млн.	38356	273973	38356
3D-принтер *Anycubic Photon Mono*	3	10	3	3	28 000	77	256	77
Ноутбук *Lenovo Ideapad 2*	100	60	100	3	70 000	6393	3836	6393
Итого						**44826**	**278064**	**44826**

3.4.3 Расчёт затрат на основную и дополнительную заработную плату и отчислений во внебюджетные фонды

Среднедневная оплата труда исполнителя $З_{сд}$ рассчитана по следующей формуле:

$$З_{сд} = \frac{З_{см} \cdot М}{F}, \quad (3.8)$$

где $З_{см}$ – среднемесячный оклад, рассчитываемый по формуле (3.9);

М – количество месяцев работы без отпуска в течение года, 10,4 месяца для 6-дневной рабочей недели;

F – действительный годовой фонд рабочего времени (определён по таблице 3.9).

$$З_{см} = З_{ок} \cdot (1 + k_{над} + k_{пр}) \cdot k_{рег}, \quad (3.9)$$

где $З_{ок}$ – окладная часть без учёта поправочных коэффициентов,

$k_{над}$ – коэффициент доплат и надбавок, принятый 0,3;

$k_{пр}$ – коэффициент премирования, принятый 0,3 для научного руководителя и 0,2 для остальных исполнителей;

$k_{рег}$ – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска.

Таблица 3.9 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Научный сотрудник	Инженер
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней	66	66	66
Потери рабочего времени (отпуск, невыходы по болезни), дн	62	55	55
F, дн	237	244	244

Расчёт среднедневной оплаты труда приведён в таблице 3.10. Расчёт основной заработной платы $З_{осн}$ приведён в таблице Б2 приложения Б.

Таблица 3.10 – Расчёт среднедневной оплаты труда исполнителей

Исполнитель	$З_{ок}$, руб.	$k_{над}$	$k_{пр}$	$k_{рег}$	М, мес	F, дн	$З_{сд}$, руб./дн
Руководитель	39300	0,3	0,3	1,3	10,4	237	3587,08
Научный сотрудник	16242	0,3	0,2	1,3	10,4	244	1349,95
Инженер	16242	0,3	0,2	1,3	10,4	244	1349,95

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

Расчет дополнительной заработной платы $З_{доп}$ ведется по следующей формуле:

$$З_{доп} = З_{осн} \cdot k_{доп}, \quad (3.10)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, принятый равным 0,15.

Величина отчислений во внебюджетные фонды $З_{вн}$ (фонд социального страхования, пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования) определена из следующего выражения:

$$З_{вн} = \left(З_{осн} + З_{доп}\right) \cdot k_{вн}, \quad (3.11)$$

где $k_{вн}$ – коэффициент страховых отчислений.

Начиная с 2023 года согласно пункту 3 статьи 425 Налогового кодекса Российской Федерации (НК РФ) установлен единый тариф страховых взносов, равный 30%, поскольку для государственных учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, не установлены пониженные тарифы (статья 427 НК РФ) [24].

Расчёт дополнительной заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды приведён в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Дополнительная заработная плата исполнителей и отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	$З_{осн}$, руб.			$З_{доп}$, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель	35870,8	35870,8	35870,8	5380,6	5380,6	5380,6
Инженер	120145,6	113395,8	137694,9	18021,8	17009,4	20654,2
Научный сотрудник	5399,8	25649,1	5399,8	810,0	3847,4	810,0
Итого	161416,2	174915,7	178965,5	24212,4	26237,3	26844,8
$З_{вн}$, руб. ($k_{вн}$ = 0,3)						
Исполнение 1	55688,6					
Исполнение 2	60345,9					
Исполнение 3	61743,1					

3.4.4 Расчёт контрагентных и накладных расходов

Контрагентные расходы $З_к$ требуются только в случае исполнения 2 и включают себя изготовление алюминиевых коллиматоров методом

порошковой металлургии. Исходя из стоимости изготовления коллиматоров 200 руб./шт., контрагентные расходы составят 1200 руб.

Накладные расходы учитывают прочие затраты на реализацию научно-исследовательского проекта. В данном случае в статью накладных расходов попадают: печать отчётной документации, оплата услуг связи (Интернет) и электроэнергии.

Объём накладных расходов для основного исполнения проекта определён следующим образом:

$$З_{нр} = \left(З_{м} + З_{ос} + З_{доп} + З_{вн} + З_{к}\right) \cdot k_{нр}, \quad (3.12)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы, равный 0,16.

3.4.5 Формирование итогового бюджета

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта. Расчёт итогового бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Бюджет научного исследования

Наименование статьи	Сумма, руб		
	Исполнение 1	Исполнение 2	Исполнение 3
Материальные затраты	10 056	10 056	10 056
Затраты на ПО	15372	0	23100
Затраты на специальное оборудование	44826	278064	44826
Затраты по основной заработной плате исполнителей	161416,2	174915,7	178965,5

Продолжение таблицы 3.12

Наименование статьи	Сумма, руб		
	Исполнение 1	Исполнение 2	Исполнение 3
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей	24212,4	26237,3	26844,8
Отчисления во внебюджетные фонды	55688,6	60345,9	61743,1
Контрагентные расходы	0	1200	0
Накладные расходы	48990,1	87197,7	54330,7
Итоговый бюджет затрат	361422,5	638949,9	400821,1

Структура бюджета основного варианта исполнения проекта изображена на рисунке 3.1.

Рисунок 3.1 – Структура бюджета основного варианта исполнения проекта

Наибольшая по величине статья затрат – основная заработная плата исполнителей, что объясняться отсутствием необходимости в дополнительной закупке дорогостоящего оборудования. Минимальная статья расходов (без учёта контрагентных расходов в исполнении 2) – материальные затраты, поскольку данная работа сфокусирована на создании

математической модели с минимальным количеством физических экспериментов.

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

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования $I_{эф}$. Его нахождение осуществляется посредством определения двух средневзвешенных величин: интегрального показателя финансовой эффективности $I_ф$ и интегрального показателя ресурсоэффективности $I_р$.

$I_ф$ определяется из следующего выражения:

$$I_{ф\,i} = \frac{Ф_i}{Ф_{max}}, \tag{3.13}$$

где $Ф_i$ – стоимость i-го варианта исполнения;

$Ф_{max}$ – максимальная стоимость исполнения исследования.

$I_р$, в свою очередь, определяется по формуле:

$$I_{р\,i} = \sum a_i \cdot b_i, \tag{3.14}$$

где a_i – весовой коэффициент i-го варианта исполнения проекта в категории сравнения;

b_i – балльная оценка i-го варианта исполнения проекта в категории сравнения.

Сравнение характеристик вариантов исполнения проекта и расчёт $I_р$ приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения исследовательского проекта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3
Устойчивость условий среды (моделируемой или реальной)	0,25	5	1	5
Продолжительность сеансов моделирования (измерений)	0,1	1	3	2
Точность результатов	0,3	3	4	1
Энергосбережение	0,1	3	1	4
Материалоёмкость	0,25	5	1	5
Итоговый I_{pi}		3,8	2,1	3,4

Интегральный показатель эффективности варианта исполнения проекта $I_{эф}$ представляет собой отношение показателя ресурсоэффективности к показателю финансовой эффективности:

$$I_{эф\,i} = \frac{I_{р\,i}}{I_{фин\,i}} \tag{3.17}$$

В свою очередь, сравнительная эффективность варианта исполнения $Э_{ср}$ является отношением его интегрального показателя к интегральному показателю альтернативного варианта с наибольшим значением $I_{эф\,max}$:

$$Э_{ср\,i} = \frac{I_{эф\,i}}{I_{эф\,max}} \tag{3.18}$$

Сравнение показателей $I_{ф}$, $I_{р}$, $I_{эф}$ и $Э_{ср}$ для рассмотренных вариантов исполнения приведено в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности научного исследования

Показатель	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Интегральный финансовый показатель разработки	0,57	1	0,63
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,8	2,1	3,4
Интегральный показатель эффективности	6,71	2,10	5,42
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,31	0,81

Таким образом, наиболее предпочтительным вариантом исполнения из рассмотренных с точки зрения ресурсной, финансовой и экономической эффективности является исполнение 1, а именно использование имитационной модели для исследования влияния различных коллиматоров на энергетическое разрешение и эффективность счёта детектора.

3.6 Заключение по разделу

По результатам оценки коммерческого потенциала и перспективности научных исследований выявлено, что ячеистые коллиматоры альфа-частиц являются наиболее конкурентоспособным техническим решением в сравнении с электронными коллиматорами и коллиматорами с одним отверстием. Проведённый *SWOT*-анализ показал, что наиболее приоритетными путями развития проекта являются:

1) введения дополнительных поправок и усовершенствования геометрии измерения в математической модели с целью уточнения результатов;

2) внедрение многопоточности вычислений;

3) создание опытных образцов коллиматоров из металла или композитного пластика.

Также был составлен план проведения исследования, выделены основные этапы и виды работ, работы распределены между исполнителями, обозначены сроки выполнения. Рассчитан бюджет исследования, который составил 361 422,5 руб.

Среди возможных альтернатив проведения научных исследований были выделены экспериментальный метод и составление аналитической модели, однако при последующем анализе ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности выбранный вариант исполнения проекта оказался наиболее эффективным с $I_{эф} = 6,71$.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А91	Котляревской Анне Сергеевне

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
− *Характеристика объекта исследования и области его применения.* − *Описание рабочей зоны (рабочего места) при проведении исследования*	Объект исследования: эффективность регистрации и энергетическое разрешение в альфа-спектрометрических измерениях. Область применения: альфа-спектрометрия. Рабочая зона: лаборатория № 318 корпуса №10 ТПУ
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность при проведении исследования	Вредные и опасные производственные факторы: − повышенный уровень шума; − параметры микроклимата; − освещение рабочего места; − психофизиологические факторы; − ионизирующие излучения; − электрический ток. Электробезопасность, пожаро- и взрывоопасность рабочей зоны.
2. Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях (АС и ЧС) при проведении исследования	Возможные АС и ЧС: пожар, поражение электрическим током, падение с опорной поверхности на ту же поверхность. Наиболее вероятная АС или ЧС: пожар.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.04.2023

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А91	Котляревская Анна Сергеевна		

Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б1 – *SWOT*-анализ

	Сильные стороны: С1. Наличие измерительного оборудования для верификации результатов моделирования С2. Возможность изготовления пластиковых коллиматоров на месте С3. Возможность подбора параметров коллиматоров без изготовления	**Слабые стороны:** Сл1. Отсутствие технологии оперативного изготовления металлических коллиматоров Сл2. Значимые ограничения результатов моделирования Сл3. Протяжённость сеансов моделирования во времени
Возможности: В1. Распространение технологий порошковой металлургии В2. Появление новых композитных пластиков для 3D-печати В3. Неудовлетворённый спрос на коллиматоры альфа-излучения	Математическая модель позволяет снизить стоимость разработки и даёт потенциал использования новых материалов для улучшения функциональности продукта. При этом разработка востребована по причине отсутствия предложения по изготовлению коллиматоров под конкретные цели.	Разработка может быть усовершенствована благодаря уточнению модели и переходу на многопоточные вычисления. Возможно привлечение сторонних организаций для изготовления металлических коллиматоров.
Угрозы: У1. Снижение спроса на подобные разработки У2. Несвоевременное государственное финансирование разработки У3. Выход на рынок более конкурентоспособной разработки	В условиях сниженного спроса и финансовых ограничений разработка может быть направлена на удовлетворение собственных потребностей лабораторий НИ ТПУ в коллиматорах для повышения точности измерений.	Задержки в финансировании отсрочат переход на изготовление металлических коллиматоров. При таких условиях основной вектор развития может быть направлен на уточнение математической модели и оптимизации кода.

Таблица Б2 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ									$Ч_i$, чел.	$Т_{рi}$, раб. дн.			$Т_{кi}$, кал. дн.		
	$t_{min\ i}$, чел.-дн.			$t_{max\ i}$, чел.-дн.			$t_{ожi}$, чел.-дн.									
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Составление и утверждение ТЗ	1			4			2,2			1	2,2			3		
2. Подбор и изучение материалов по теме	10			15			12			1	12			15		
3. Выбор направления работ	1			2			1,4			2	0,7			1		
4. Подготовка к проведению измерений (3D-печать образцов)	2	8	2	4	10	4	2,8	8,8	2,8	1	2,8	8,8	2,8	3	10	3
5. Проведение экспериментов	5	35	5	7	49	7	5,8	40,6	5,8	1	5,8	40,6	5,8	7	50	7
6. Обработка результатов эксперимента	2	14	2	4	28	4	2,8	19,6	2,8	2	1,4	9,8	1,4	2	12	2
7. Проведение предварительных расчётов, составление математической модели	5	0	20	10	0	40	7	0	28	1	7	0	28	9	0	34
8. Корректировка математической модели	20	0	20	35	0	35	26	0	26	1	26	0	26	32	0	32
9. Оценка согласованности полученных результатов	2			10			5,2			2	2,6			3		

Продолжение таблицы Б2

Название работы	Трудоёмкость работ									$Ч_i$, чел.	$Т_{рi}$, раб. дн.			$Т_{кi}$, кал. дн.		
	$t_{min\ i}$, чел.-дн.			$t_{max\ i}$, чел.-дн.			$t_{ожi}$, чел.-дн.									
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
10. Проведение моделирования и обработка результатов	14	0	7	20	0	10	16,4	0	8,2	1	16,4	0	8,2	20	0	10
11. Составление отчётной документации	10			18			13,2			1	13,2			16		
12. Корректировка отчётной документации	5			10			7			2	3,5			4		

Таблица Б3 – Расчёт основной заработной платы исполнителей

Название работы	Исполнители	$Т_{рi}$, раб. дн.			$З_{сд}$, руб./дн	$З_{осн}$, руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3		Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Составление и утверждение ТЗ	Рук.	2			3587,08	7174,16		
2. Подбор и изучение материалов по теме	Инж.	12			1349,95	16199,4		
3. Выбор направления работ	Рук.	1			3587,08	3587,08		
	Инж.				1349,95	1349,95		
4. Подготовка к проведению измерений (3D-печать образцов)	Науч. сотр.	3	9	3	1349,95	4049,85	12149,55	4049,85
5. Проведение экспериментов	Инж.	6	41	6	1349,95	8099,7	55347,95	8099,7

Продолжение таблицы Б3

Название работы	Исполнители	T_{pi}, раб. дн.			$З_{сд}$, руб./дн	$З_{осн}$, руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3		Исп.1	Исп.2	Исп.3
6. Обработка результатов эксперимента	Инж.	1	10	1	1349,95	1349,95	13499,5	1349,95
	Науч. сотр.				1349,95	1349,95	13499,5	1349,95
7. Проведение предварительных расчётов, составление математической модели	Инж.	7	0	28	1349,95	9449,65	0	37798,6
8. Корректировка математической модели	Инж.	26	0	26	1349,95	35098,7	0	35098,7
9. Оценка согласованности полученных результатов	Рук.	3			3587,08	10761,24		
	Инж.				1349,95	4049,85		
10. Проведение моделирования и обработка результатов	Инж.	16	0	8	1349,95	21599,2	0	10799,6
11. Составление отчётной документации	Инж.	13			1349,95	17549,35		
12. Корректировка отчётной документации	Рук.	4			3587,08	14348,32		
	Инж.				1349,95	5399,8		
Итого						**161416,15**	**174915,65**	**178965,5**