

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

BACHELOR WORK

Topic of research work
Calculation of the Q-cascade for the production of highly enriched lead-206

UDC 621.039.3:546.815.027

Student

Group	Full name	Signature	Date
0A92	Romanis M. E.		

Scientific supervisor

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor	Orlov A.A.	Grand PhD in Engineering sciences		

ADVISERS:

Section “Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving”

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor	Gasanov M.A.	Grand PhD in Engineering sciences		

Section “Social Responsibility”

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor	Perederin Y.V.	Grand PhD in Engineering sciences		

ADMITTED TO DEFENSE:

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Senior Lecturer	Selivanikova O.V.	-		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
Универсальные	
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	
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	
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

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

APPROVE BY:
Program Director

_____ (Signature) _____ (date) _____ (Full name)

EXERCISE
for graduation qualification work

In the shape of:

bachelor work

Student:

Group	Full name
0A92	Romanis Mikhail Evgenievich

Work theme:

Calculation of the Q-cascade for the production of highly enriched lead-206	
Approved by the order of the director (date, number)	№ 27-76/С от 27.01.2023

Deadline for student submission of completed work:	05.06.2023 г.
--	---------------

TECHNICAL TASK:

Initial data for work	Task. Literature sources on the method of calculating the Q-cascade, the use of lead and its isotopes, the physicochemical properties of tetramethyllead, the features of the process of separation of multicomponent isotope mixtures.
List of issues to be researched, designed and developed	<ol style="list-style-type: none"> 1. Review and analysis of literature 2. Description of the parameter calculation algorithm Q-cascade 3. Results of calculations, their analysis 4. Financial management, resource efficiency and resource saving 5. Social responsibility 6. Conclusions

List of graphic material	<p>Figures:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Model of a countercurrent-symmetric GC cascade 2. Separating stage 3. Model of a multi-stage separation process 4. Separation model in a four- flow cascade 5. Screenshot with a system of equations for calculating the number of stages in the enrichment and regenerative parts of the cascade 6. Screenshot of the system of equations for calculating the number of stages of the cascade after the change of variables 7. Solving the system of equations 8. Cascade profile for the first separation phase 9. Change in the concentration of lead isotopes by stages of the cascade of the first phase of separation 10. Profiles of Cascade 1 with $C_w=0.1\%$ and Cascade 2 with $C_w=0.3\%$ for the second phase of separation 11. Change in the concentration of lead isotopes by stages of Cascade 1 for the second phase of separation 12. Change in the concentration of lead isotopes by stages of Cascade 2 for the second phase of separation
---------------------------------	--

Consultants for the sections of the final qualifying work	
Chapter	Consultant
Calculation of the Q-cascade for the production of highly enriched lead-206	Professor of the Department of Nuclear Fuel Cycle, Grand PhD in Engineering sciences, Orlov Alexey Alekseevich
Data analysis	
Financial management, resource efficiency and resource saving	Professor of the Department of Social Sciences and Humanities, Grand PhD in Economic sciences, Hasanov Maharram Ali
Social responsibility	Associate Professor of the Department of Nuclear Fuel Cycle, Grand PhD in Engineering sciences, Perederin Yuri Vladimirovich

Date of issue of the assignment for graduation qualification work on a linear schedule	24.04.2023
---	------------

The task was given by the leader:

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor	Orlov A.A.	Grand PhD in Engineering sciences		

The task was accepted by the student:

Group	Full name	Signature	Date
0A92	Romans M.E.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0A92	Романис Михаил Евгеньевич

Школа	ИЯТШ	Отделение	Отделение информационных технологий
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
3. Планирование процесса управления НИТ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИТ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение оценки экономической эффективности определения отношений между пользователями социальной сети Twitter на основе анализа текста сообщений.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИТ
4. Расчёт денежного потока
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИТ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН ШБИП	Гасанов Магеррам Али оглы	д. э. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A92	Романис Михаил Евгеньевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А92	Романис Михаилу Евгеньевичу

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

Тема ВКР:

Расчет Q-каскада по получению высокообогащенного свинца-206

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: Q-каскад. Область применения: атомная промышленность.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Правовые нормы трудового законодательства; – Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ: – ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.
--	--

2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – отклонение показателей микроклимата; – повышенный уровень шума; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – недостаточная освещенность; – электробезопасность; – психофизиологические факторы; – пожарная и взрывная безопасность
--	--

3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– выбор и описание типичной ЧС: пожар; – обоснование мероприятий по предотвращению ЧС; – порядок действий при возникновении ЧС.
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.03.2023 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А92	Романис Михаил Евгеньевич		

ABSTRACT

The final qualification work contains: 85 pages, 33 tables, 14 figures, 44 references.

Key words: tetramethyllead, Q -cascade, mass transfer, mathematical model, non-stationary process.

The object of the study is the Q -cascade for the production of tetramethyllead highly enriched in ^{206}Pb .

Purpose of work: to calculate the parameters of the Q -cascade for the production of highly enriched ^{206}Pb .

In the course of the study, the following were carried out: calculations of the 1st and 2nd phases of separation, as a result of which the profiles of the corresponding Q -cascades and the dependence of the distribution of the concentration of lead isotopes over their stages. It is shown that lead isotopes are distributed over the stages of cascades in accordance with their mass numbers. The largest change in the concentration of lead isotopes takes place at the end stages of the cascades, the smallest - near the feed flow stage.

When calculating the parameters of the Q -cascade, it was found that it is impossible to obtain the required concentration of ^{206}Pb in one phase of separation. The maximum concentration of the target isotope in the first phase of separation is 90,41% at the stage of the light fraction selection flow of the cascade. The number of stages in the cascade was 64,21.

At the second separation phase, using a multi-stage separation process, Cascade 1 and Cascade 2 were calculated with the concentration of the target isotope in the heavy fraction manifold is 0,1% and 0,3%, respectively. It is possible to achieve a ^{206}Pb concentration of 95,76% and 95,79%, respectively, in light fraction manifold of Cascade 1 and Cascade 2, and a concentration 89,32% of ^{207}Pb in heavy fraction manifold of the Cascade 1. and Cascade 2 of the second separation stage were 81,34 and 72, respectively.

Содержание

Introduction.....	12
1. Theoretical part	13
1.1 Properties and uses of lead and its isotopes	13
1.2 Properties of working substance $Pb(CH_3)_4$	14
1.3 Specificity of separation of multicomponent isotope mixtures.....	16
1.4 Model Cascades.....	23
2. Q-cascade calculation method	26
3. Calculation of Q-cascade parameters	30
3.1 Calculation of the parameters of the cascade of the first phase of separation ..	30
3.2 Calculation of the parameters of the cascade of the second phase of separation	37
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	42
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	42
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	42
4.1.2 SWOT-анализ.....	44
4.2 Планирование научно-исследовательского проекта	47
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	47
4.2.2 Определение трудоёмкости выполнения работ.....	48
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	48
4.3 Бюджет научно-технического исследования	50
4.3.1 Расчёт материальных затрат	51
4.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных работ	52

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	53
4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	54
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	55
4.3.6 Накладные расходы	55
4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта ...	56
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	57
Выводы по разделу ”Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение”	59
5. Социальная ответственность	60
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	61
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства	61
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	62
5.2 Производственная безопасность	64
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов	64
5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов	66
5.2.3 Отклонение показателей микроклимата	66
5.2.4 Превышение уровня шума	67
5.2.5 Повышенный уровень электромагнитного излучения	68
5.2.6 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	68
5.2.7 Электробезопасность.....	72
5.2.8 Психофизиологические факторы.....	75
5.2.9 Пожарная и взрывная безопасность	76

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	78
Выводы по разделу «социальная ответственность»	79
Conclusions.....	80
Список используемых источников.....	81

Introduction

Isotopes are atoms of the same chemical element that differ in mass number. The difference in mass entails a difference in the properties of the elements: density, diffusion coefficient, specific ion charge, rate of chemical reactions, equilibrium distribution coefficient, and others. To effectively use the properties of certain isotopes, it is necessary to enrich them in the natural isotopic mixture to a high concentration. The main industrial method of enrichment is the gas centrifuge method, where the isotopic mixture in the gas phase is fed into a rapidly rotating rotor of a gas centrifuge. In this case, heavy isotopes are concentrated near the rotor wall, light isotopes are relatively closer to the rotor axis, due to this, a separation effect is achieved. In the cascade, the initial isotope mixture is separated into a heavy fraction enriched in heavy isotopes and a light fraction with an increased concentration of light isotopes.

Lead and its isotopes are widely used in geology, medicine (for example, for the synthesis of medical radioisotopes) and nuclear power, and lead also plays an important role in reactor engineering, where it is used as a liquid metal coolant in the form of Pb or in the form of a Pb-Bi alloy in reactors at fast neutrons.

The relevance of the work is due to the need to use the methodology for calculating the parameters of model cascades to determine the possibility of obtaining a highly enriched target isotope and to estimate the economic costs of its production, since the theory of separation of multicomponent isotope mixtures, in contrast to the theory for two-component isotope mixtures, does not allow calculating the parameters of a real cascade. Launching a cascade for separating multicomponent mixtures is an expensive, time-consuming and science-intensive process that requires a huge amount of time and resources. To assess the possibility of separating lead isotopes and obtaining highly enriched ^{206}Pb , it is most rational to calculate a model cascade. The paper presents the calculation of the parameters of the Q -cascade to obtain ^{206}Pb enriched to a concentration of 95%.

1. Theoretical part

1.1 Properties and uses of lead and its isotopes

Lead is a grayish-white metal. The melting point of lead is 327,4°C, the boiling point is 1745°C. The density of solid lead is 11,336 g/cm³.

Mechanical properties are low: Brinell hardness is only 28–42 MPa, the metal is soft, ductile, easily rolled into the thinnest foil.

The specific heat capacity of lead at 18°C is 0.12 kJ/kg·K, and that of liquid lead is 0.142 kJ/kg·K [1].

For nuclear energy, Pb is attractive due to a number of its inherent nuclear and thermophysical properties - high boiling point, low chemical activity and radioactivity. In this regard, at present, Pb or Pb-Bi alloy are considered as a liquid-metal coolant for fast reactors with increased safety reactors [2].

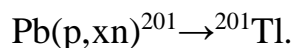
Natural lead is a mixture of four isotopes: ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb. The natural concentration of isotopes is shown in Table 1. The last three isotopes are the end products of the radioactive decay of uranium, actinium and thorium [3].

Table 1 - Initial data on lead isotopes [4]

Isotope	Natural concentration, %	Degree of enrichment, %	Chemical form
²⁰⁴ Pb	1,40	95–98	Metal (Pb)
²⁰⁶ Pb	24,10		
²⁰⁷ Pb	22,10	99,00	
²⁰⁸ Pb	52,40	99,80	

Each of the isotopes of lead finds application in science and technology. ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb are used to create isotope standards used in the search for uranium deposits. ²⁰⁴Pb is also used in the development of neutron activation detectors for spectrometry of intense neutron fields. ²⁰⁷Pb is used to determine the age of rocks [5].

When a target enriched with stable isotopes ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb and ^{208}Pb is irradiated with a proton beam with an energy of 100 MeV according to the reaction:



It is possible to obtain the radionuclide ^{201}Tl , which is widely used in nuclear medicine for cardiovascular research due to its nuclear and biological characteristics.

At the moment, in the development of new nuclear power plants, priority is given to fast neutron reactors (FNR) with a heavy liquid metal lead-bismuth coolant. Internal self-protection, compensation of uranium fuel burn-up by plutonium fuel production, and other positive qualities of the FNR make it possible in the future to increase the operating campaign of the reactor up to 10-12 years, and the service life of the FNR - up to 30-60 years [6, 7].

The FNR coolant, circulating through the reactor core, is activated and produces long-lived radionuclides. Taking into account the amount of coolant in the FNRs under consideration and the scale of introduction of small nuclear power plants in the future, problems may arise in the management of spent coolant after the FNR is decommissioned and during repair and emergency work. Therefore, it is desirable to have a coolant with a low content of long-lived radionuclides - products of nuclear reactions. Lead enriched in ^{206}Pb can be used as such a coolant. Its concentration in a natural mixture of lead isotopes is ~24%, and the required isotope enrichment does not exceed 95–98% [8].

1.2 Properties of working substance $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$

The working substance used in the separation of lead isotopes by the gas centrifuge method is tetramethyl lead, $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$.

Under normal conditions, $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ is a colorless liquid with a characteristic odor; it has a tetrahedral structure with a lead atom in the center [9].

Table 2 shows the properties of tetramethyl lead - melting and boiling points, enthalpy of sublimation and evaporation and density.

Table 2 - Properties of tetramethyl lead

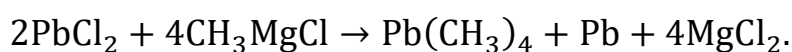
Compound	Properties				
	T_{melt}, K	T_{boiling}, K	$\Delta H_{\text{sublimation}}$	$\Delta H_{\text{evaporation}}$	$\rho, \text{g/cm}^3$
$\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$	300.5	383	97.9	135.9	2.034

$\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$, like most organometallic compounds, is relatively non-reactive. The compound exhibits stability in air at room temperature, does not participate in reactions inherent in organometallic compounds, such as addition to a carbonyl group. $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ is resistant to aqueous bases and dilute acids.

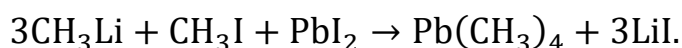
Tetramethyllead is obtained in three ways: - Interaction of Pb(II) salts with organomagnesium compounds (Grignard reagent);

- Electrolysis of complex organometallic compounds on a lead anode;
- Interaction of Pb alloys and alkali metals with alkyl halides in the presence of organic catalysts [2].

The synthesis of $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ using the Grignard reagent is described in [10], the yield of the target component is about 70%. The formation of $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ proceeds according to the following reaction:

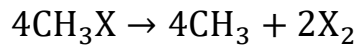


In some cases, lithium compounds can be used to synthesize $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$. Then the reaction looks like this [11, 12]:



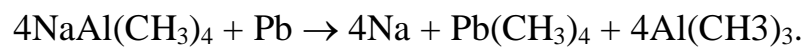
Several options are used in the electrochemical method: electrolytic reduction of alkyl halides on a lead cathode in an alkali solution, where graphite serves as an anode; electrolysis of complex organometallic compounds on a lead anode; electrolysis of the Grignard reagent.

During the reduction of alkyl halides, the following reactions occur:



where X is a halogen atom.

During the electrolysis of $\text{NaAl}(\text{CH}_3)_4$ or $\text{KAl}(\text{CH}_3)_4$, an alkali metal is released at the cathode, and a mixture consisting of $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ and $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ is released at the anode. Due to the high melting point of aluminum complex compounds, the process of obtaining $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ is carried out in a tetrahydrofuran medium. The process proceeds according to the following reaction:



Na liberated at the cathode is separated in the form of mercury amalgam, i.e. mercury is used as a cathode, otherwise $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ settles on the surface of the anode and prevents the passage of current. The resulting sodium amalgam is decomposed with water into alkali and hydrogen, which is used in the production of sodium hydride. Sometimes the $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ and $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ liberated at the anode are difficult to separate. In this case, NaF is added to the mixture, with which $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ forms stable complexes. After that, $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ is easily separated from the mixture by distillation. The yield of $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ is more than 90% of the theoretical one. The resulting $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ is separated by steam distillation [13].

1.3 Specificity of separation of multicomponent isotope mixtures

Separation of a multicomponent isotope mixture occurs in a cascade of gas centrifuges (GC). The working substance contains n components (isotopes) with index j ($j = 1, \dots, n$). The cascade consists of S stages with index i ($i = 1, \dots, S$). The stages are connected in a countercurrent-symmetric scheme (Figure 1). Feed flow F is fed into the cascade and flows of light P and heavy W fractions are taken. The feed flow is supplied to the stage with index S_F , the heavy fraction flow is taken from the first stage, and the light fraction flow is taken from stage S [14]. The separating

stage consists of N_i GCs connected in parallel. It is supplied with a G_{Fi} power flow. The flows of light G_{Pi} and heavy G_{Wi} fractions are taken from the stage (Figure 2).

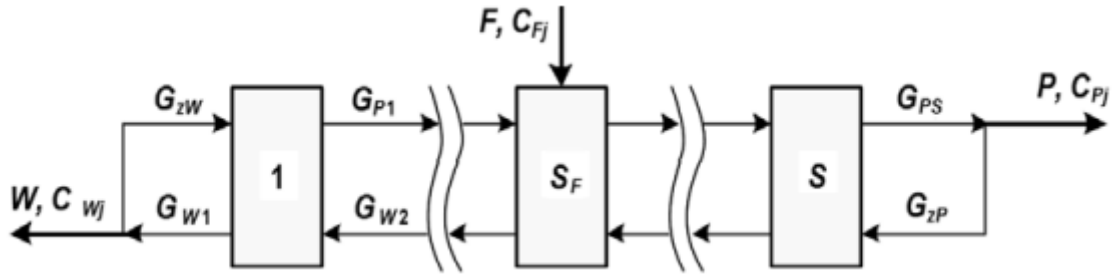
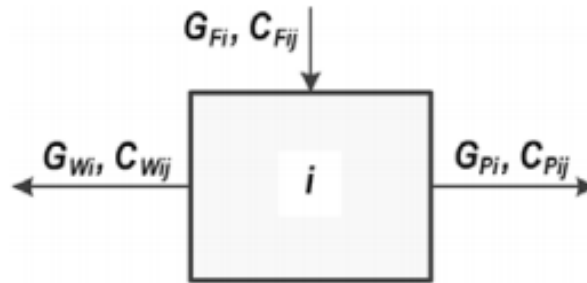


Figure 1 - Model of a countercurrent-symmetric GC cascade



Picture 2 - Separating stage

The concentration of the j -th component in the feed flows, light and heavy fractions of the i -th stage are designated C_{Fij} , C_{Pij} and C_{Wij} , respectively. The heavy fraction of the first stage can be partially returned by the swirling flow of the heavy fraction G_{zW} to feed the first stage. The light fraction of the S stage can be partially returned by the swirling flow of the light fraction G_{zP} to feed the S stage [15].

In the absence of corrosion losses of the working substance, the flows of the stages and the concentrations of components in them in a stationary hydraulic mode are related by the equations of the balance of the working substance and component (isotope):

$$G_{Fi} = G_{Pi} + G_{Wi}, \quad (1)$$

$$G_{Fi} \cdot C_{Fi} = G_{Pi} \cdot C_{Pi} + G_{Wi} \cdot C_{Wi}, \quad (2)$$

$$\theta_i = G_{Pi} / G_{Fi}, \quad (3)$$

where θ_i is the division factor of the power flow of the i -th stage.

The sum of the concentrations of all components for any flow is equal to one.

The separation of components in a stage is determined by the expressions:

$$\chi_{ijl} = (C_{Pij} \cdot C_{Pij}) / (C_{Pij} \cdot C_{Pij}), \quad (4)$$

$$\chi_{ijl} = \chi_{0i}^{M_j - M_l}, \quad (5)$$

where χ_{ijl} is the separation factor of the j -th and l -th components in the i -th stage; χ_{0i} is the separation factor per unit difference of mass numbers; M_j , M_l are the mass numbers of the j -th and l -th components, respectively.

The value of χ_{0i} depends on the hydraulic parameters of the stage:

$$\chi_{0i} = f(G_{Fi}, \theta_i), \quad (6)$$

The flows of the cascade in the stationary hydraulic mode are connected by the balance equations:

$$F = P + W, \quad (7)$$

$$F \cdot C_F = P \cdot C_P + W \cdot C_W, \quad (8)$$

The use of gas centrifuge technology to obtain an isotopically modified product is accompanied by non-stationary hydraulic processes. These processes affect many parameters of the separation cascade, in particular, the flow of the working mixture inside the stages of the cascade, the extraction and waste flows, as well as the pressure in the routes. Non-stationary hydraulic processes directly affect the content of isotopes in the working mixture in the stages and flows of the cascade. The value of the influence of non-stationary processes on the process of separation of a multicomponent isotope mixture is determined by the value of the gas content in the volume of the separating element. In a gas centrifuge, the gas pressure in the rotor is much less than atmospheric, which means that non-stationary processes will have a greater effect on the distribution of isotopes than, for example, with the gas

diffusion separation method. An important factor is the fact that the separation of multicomponent mixtures is carried out in cascades much smaller than, for example, cascades for the production of ^{235}U [15].

In [16], the influence of nonstationary processes on the distribution of isotopes in a multicomponent isotopic mixture over the stages of the cascade was studied in the process of filling the cascade with the working mixture (in the non-selective mode).

The process of separating a multicomponent isotopic mixture can be conditionally divided into two stages: the nonstationary process of filling the cascade with the working mixture and the stationary mode of separation. The non-stationary process is due to two main processes - the establishment of predetermined pressures in the cascade paths and the distribution of the mixture components over the stages according to their mass numbers [15-17].

For a mathematical description of a non-stationary process, the following provisions are used [17]:

Each of the stages of the cascade contains a finite number of separating elements, and, accordingly, volumes.

For a given component (isotope) of the mixture, such characteristics as pressure, temperature, and concentration are unchanged in a given stage of the separation cascade.

The basic equations of the model are the equations of the balance of the working substance and components in each volume and the equation for the separation of a multicomponent isotope mixture in the GC.

When filling the separating cascade with a multicomponent isotope mixture in a non-extraction mode, the pressure and flows of the working mixture in the stages and collectors of the extraction and waste stages increase to stationary values.

During the filling of the separating cascade, the separation of the components of the isotope mixture occurs. According to their molecular weight, they are distributed among the stages of the separating cascade. Intermediate isotopes are

concentrated in the middle part of the cascade and are distributed in ascending order of mass numbers from the S -th stage towards the first stage of the cascade.

The highest concentration for the selected component of the mixture is observed in the stage where the weighted average mass number of the mixture coincides with the mass number of the isotope.

In addition to the value of the feed flow of the cascade, the process of separating the isotopic mixture during the filling of the cascade is affected by the position of the feed flow and the number of stages of the separating cascade [16].

The study of transient processes by mathematical modeling is a complex and time-consuming process. The existing methods for studying nonstationary processes for binary mixtures are not suitable for modeling the behavior of a multicomponent isotope mixture. The use of numerical integration is possible by writing suitable software, but at the moment there is no single standard. The most used approach at the moment is the use of differential-difference models and grid finite-difference equations.

A significant drawback of the former is that for boundary value problems of this type, implicit schemes turn out to be quite stable, which lead to the fact that large systems of nonlinear algebraic equations have to be solved on each calculated time layer. The use of traditional explicit methods, free from this shortcoming, is limited by an unacceptably small value of the time integration step [16, 18].

The second approach is justified by the fact that at present the methods of numerical integration of ordinary differential equations are better developed than the methods for solving systems of nonlinear algebraic equations. Differential-difference models (“method of lines”) can be considered as a limiting case of grid models, when one of the grid sizes (time integration step) tends to zero [19].

After the steady state is established and the components are distributed over the stages of the cascade, the concentrations of intermediate isotopes can have a maximum at the inner stages, in contrast to the extreme isotopes, which have maxima in the extraction and waste, respectively. When organizing a technological

scheme with additional selection in stages with the maximum concentration of the target isotope, it is possible to obtain a product with a higher enrichment than at the extreme stages of the separation cascade. However, obtaining a product highly enriched (90...99%) in terms of the intermediate isotope within one cascade is practically impossible.

To obtain components with a concentration higher than C_{Pk}^{\max} and C_{Wk}^{\max} there are two ways:

1. Organization of a multi-stage separation process. In one of the flows of the cascade, the concentration of the target component increases and the content of lighter or heavier components decreases, as a result of which the target component becomes extreme. Next, the resulting multicomponent mixture is again fed into the cascade, and the target component is enriched to the required concentration. Thus, it is necessary to carry out several separation processes, called separation stages. The number of stages is determined by the concentrations of the target isotope in the raw material, product, and the design of the cascade (number of stages, profile) (Figure 2) [20, 21].

2. Carrying out the separation process in a 4- flow cascade. As shown above, the intermediate component has the maximum concentration in the stages within the cascade (Figure 3).

An additional outflow is taken from the stage in which the content of the target intermediate component is maximum and not lower than the required value (Figure 4) [16, 20, 22].

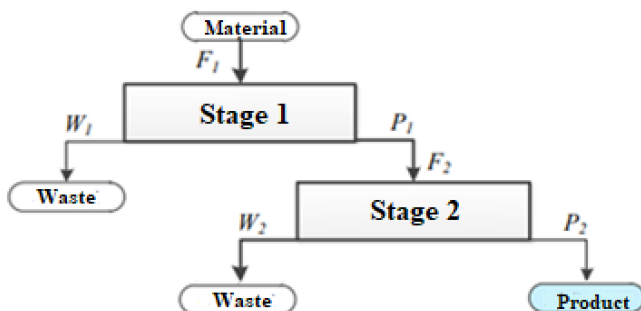


Figure 3 - Model of a multi-stage separation process

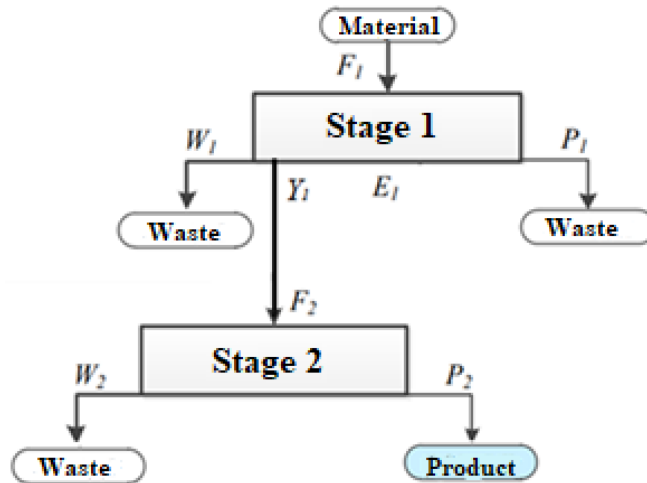


Figure 4 - Separation model in a four- flow cascade

The paper [22] shows the fundamental possibility of obtaining a relatively high concentration of intermediate components in the additional selection flow in a cascade, the distribution of the stage feed flow in which sharply increases at one of the internal stages. Such a feature in the distribution of the power flow of the stages of the cascade was called the expansion of the flow [23]. The principle of operation of an expansion cascade is based on a change in the concentration gradient of all components of the mixture being separated when the gradient function of the feed flow of the cascade stages changes. With an appropriate choice of the cascade parameters, it is possible to achieve the concentration of the target intermediate component on the internal stages, which, when the additional selection flow is turned on at one of the stages, will provide a product with a content of the target component above the limit [22, 24].

For evaluation calculations in the theory of separation cascades, model cascades are often used, whose mathematical models, based on the laws of conservation of matter, are adequate to the separation process in cascades used in practice, but at the same time make it possible to significantly simplify the calculations necessary for analysis. As a mathematical model, a Q -cascade was chosen, which is used in calculations for the case of “weak enrichment”, when the

cascade stage separation factor may differ from unity. Such a choice does not violate the generality of the problem statement, since all the revealed patterns for a symmetric countercurrent cascade in the case of “weak” and arbitrary enrichment at the stages will differ only quantitatively [25, 26].

1.4 Model Cascades

Highly enriched isotopes are widely used in science, medicine, aircraft construction, energy and many other areas. Obtaining a highly enriched isotopically modified product is a technologically complex and time-consuming process. The most difficult to produce are intermediate isotopes. In contrast to the separation of a binary mixture, in this case, not one, but several isotopes of the chemical element being separated are found in the selective and waste parts. Based on this, when separating into intermediate isotopes, a restriction is imposed on the maximum concentration in the manifold of light and heavy fraction of the separation cascade, since, based on the material balance, the sum of concentrations cannot exceed unity [27].

The process of separating multicomponent isotope mixtures in cascades of gas centrifuges has not been studied as much as the process of separating binary mixtures and has many limitations. Such concepts as separating potential and separating power cannot be used in the form in which they are usually used in the separation of binary mixtures of isotopes. The launch of a cascade for the separation of multicomponent mixtures is an expensive, labor-intensive and science-intensive project that requires an enormous amount of time and resources. To assess the possibility of separating isotopes of a given chemical element and obtaining a mixture enriched in the target isotope, it is most rational to build a model and calculate a model cascade.

A “quasi-ideal” cascade is a cascade in which the relative separation factors q_{ik} , β_{ik} , α_{ik} and the quantities introduced to describe this model cascade remain unchanged over the entire length of the cascade. From a physical point of view, the

initial choice of the introduced parameter determines the distribution of isotopes over the stages of the cascade and is the decisive factor in choosing a mathematical model and methods for its solution.

In a particular case of a quasi-ideal cascade, it is possible to construct a cascade with the same relative concentrations of two components with indices i and k , called key ones:

$$R'_{ik}(j-1) = R_{ik}(j) = R''_{ik}(j+1), j = \overline{2, n-1}.$$

In this case, the separation coefficients are constant and are determined by the expression:

$$\alpha_{ik} = \beta_{ik} = \sqrt{q_{ik}}.$$

Indexes i and k can refer to any selected components of the mixture.

With a certain choice of key components, the R -cascade is close to optimal with given external concentrations for one of the components [30, 31]. This means that the theory of R -cascades makes it possible to obtain initial approximations for calculating the optimal parameters of a cascade for given concentrations of one of the isotopes. In [31], a method for calculating R -cascades with one additional extraction flow was proposed and demonstrated using the example of a five-component mixture of tungsten isotopes. It should be noted that R -cascades constructed from key components with the same average mass number are completely identical [32–34].

Q -cascade is a model cascade used to calculate the separation parameters of multicomponent mixtures. The main feature of the Q -cascade is the introduction of the Q parameter, which is a function of the stage enrichment factor, and the characteristic function, which is a function of the stage number and concentration. Thus, there is a transition from the classical integral systems of equations describing the relationship between the extraction and waste flows with the concentrations of the i -th isotope, to exponential systems of equations. There are several methods for solving these systems, but the most common are the “secant” method, as well as the linearization of the system. The parameter Q , in turn, describes the relative increase

in the concentration of the i -th component at each stage of enrichment, relative to other components of the mixture.

Q -cascades make it possible to analyze the process of isotope concentration in a certain part of the isotopic spectrum with an appropriate choice of the Q_i value. This follows from the following reasoning. Suppose that for the i -th isotope the parameter $Q_i > 0$. In addition, it is natural to assume that we are dealing with long cascades in which P , S_P and S_W are large. When evaluating the separation effect, there is a difference in the behavior of the components for which Q_n is greater or less than zero. Considering that the expression for the coefficient ε_{ik} can be represented as $\varepsilon_{ik} = \varepsilon_0 (M_k - M_i)$, the constant Q_i for any component $i = \overline{1, m}$ can be written as:

$$Q_i = \varepsilon_0 (M_k - M_i), \quad (9)$$

where M is the parameter, the setting of which allows one to simultaneously determine the constant Q for all components of the mixture, ε_0 is the enrichment factor per unit difference in mass numbers, M_i is the mass number of the i -th component of the mixture.

All concentrations of components with mass numbers $M_i < M$ will increase, concentrations of components with mass numbers $M_i > M$ will decrease at the selective end of the cascade [29,34].

Consequently, Q -cascades make it possible to separate all isotopes of a given element into two groups, with the concentrations of all components simultaneously increasing in the first group and decreasing in the second group. In one Q -cascade, it is impossible to increase the concentration of the intermediate component in the selection indefinitely, since the sum of the concentrations of enriched isotopes should not exceed unity [29].

The most suitable for our task is the Q -cascade, since it is more suitable for the case of weak enrichment. [28, 29]. The procedure for calculating the Q -cascade parameters is described below.

2. Q-cascade calculation method

To estimate the maximum possible concentration of the target component in the extraction flow from an ordinary cascade (with three external flows: feed, waste and extraction), the following ratios are usually used:

$$C_{Pk}^{\max} = \frac{C_{Fk}}{\sum_{i=1}^k C_{Fi}}, \quad (10)$$

$$W = F - P, \quad (11)$$

$$P = F \cdot \frac{C_F - C_W}{C_P - C_W}, \quad (12)$$

$$C_{Wk}^{\max} = \frac{C_{Fk}}{\sum_{i=k}^N C_{Fi}}. \quad (13)$$

where is C_{Fk} the concentration of the i -th component in the feed flow.

Achievement of concentration C_{Pk}^{\max} and C_{Pk}^{\max} is possible in a cascade of infinite length.

In the case of a Q -cascade, the characteristic functions are usually given in the form:

$$\varphi_i(s) = \exp(Q_i s), \quad (14)$$

where Q_i are some constants related by the conditions:

$$Q_i - Q_k = \varepsilon_{ik}, \quad (15)$$

In this case, for single-phase separation methods, the relation:

$$\varepsilon_{ik} = \varepsilon_0 (M_k - M_i), \quad (16)$$

where, M_k , M_i are the mass numbers of the k -th and i -th components, respectively, ε_0 is the enrichment factor per unit difference of the mass numbers. Taking into account (15) and (16), the constants are:

$$Q_i = \varepsilon_0(M_k - M_i), \quad (17)$$

where M is a parameter, the setting of which allows one to simultaneously determine the constants for all components of the mixture and, accordingly, the functions.

$$M = \begin{cases} \frac{M_k + M_{k+1}}{2}, C_{Pk} > C_{Fk} \\ \frac{M_k + M_{k-1}}{2}, C_{Pk} < C_{Fk} \end{cases}, \quad (18)$$

The M parameter has an important physical meaning: setting the value determines such a nature of the distribution and the ratio of selection to waste, in which the components with mass numbers are enriched in the lightest component in the selection of the light fraction, and the components with $M_i > M$ ($Q_i < 0$) are enriched, respectively, in the selection of the heavy fractions. The M parameter determines the direction of transfer of the components of the mixture being separated along the length of the cascade. In this case, in the mathematical model of the Q -cascade, it is assumed that the value of the parameter M is the same in all sections of the cascade.

One of the key stages in the calculation of the Q -cascade is the determination of the number of stages in the enrichment and regenerative parts of the cascade, at a given concentration of the target isotope in a multicomponent mixture.

To derive the necessary system of equations, we use the Voltaire integral equation [18, 24]:

$$G_i(s) = L(s)c_i(s) = \frac{L(0)c_{iP} + 2Pc_{iP} \int_0^1 \varphi_i(s) ds}{\varphi_i(s)}, \quad (19)$$

where G_i is the partial flow of the component, $L(s)$ is the flow of the mixture to be separated, $L(0)$ is the flow at the selective end of the cascade (at $s=0$).

Substituting (13) into (19), while taking into account the condition for minimizing the total flow $L(0)=0$, as well as:

$$L(s) = \sum_{i=1}^N G_i(s), \quad (20)$$

$$c_i(s) = \frac{G_k(s)}{\sum_{i=1}^N G_i(s)}, \quad (21)$$

After mathematical transformations, we obtain the following expressions:

$$G_i(s) = \frac{2Pc_{iP}}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i s)], \quad (22)$$

$$L(s) = 2P \sum_{i=1}^m \frac{c_{iP}}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i s)], \quad (23)$$

$$c_i(s) = \frac{\frac{c_{iP}}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i s)]}{\sum_{i=1}^m \frac{c_{iP}}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i s)]}. \quad (24)$$

Equations (22-24) reflect the distribution of concentrations and flux in the enrichment part of the Q -cascade.

Similar equations can be written for the regenerative part of the cascade:

$$G_i(s) = \frac{2Wc_{iW}}{Q_i} [\exp(Q_i s) - 1], \quad (25)$$

$$L(s) = 2W \sum_{i=1}^m \frac{c_{iW}}{Q_i} [\exp(Q_i s) - 1], \quad (26)$$

$$c_i(s) = \frac{\frac{c_{iW}}{Q_i} [\exp(Q_i s) - 1]}{\sum_{i=1}^m \frac{c_{iW}}{Q_i} [\exp(Q_i s) - 1]}. \quad (27)$$

Using the obtained relations (21), (22) and (23), (26) and the equation

$c_i(s) = \frac{G_k(s)}{\sum_{i=1}^N G_i(s)}$, it is possible to express the concentration and c_{ip} in the enrichment and c_{iw} regenerative parts of the cascade through the concentration c_{if} at the feed point and, using the material balance equations, exclude c_{if} and express c_{ip} and c_{iw} through the concentrations in the feed flow:

$$c_{iP} = \frac{1 - \exp(Q_i S_W)}{\exp(-Q_i S_P) - \exp(Q_i S_W)} c_{iF} \Bigg/ \frac{\sum_{k=1}^N \frac{1 - \exp(Q_k S_W)}{\exp(-Q_k S_P) - \exp(Q_k S_W)} c_{kF}}{\quad}, \quad (28)$$

$$c_{iW} = \frac{\exp(-Q_i S_P) - 1}{\exp(-Q_i S_P) - \exp(Q_i S_W)} c_{iF} \Bigg/ \frac{\sum_{k=1}^N \frac{\exp(-Q_k S_P) - 1}{\exp(-Q_k S_P) - \exp(Q_k S_W)} c_{kF}}{\quad}. \quad (29)$$

The solution of this system of equations is a very time-consuming process and the complexity of calculations increases with an increase in the number of stable isotopes for a given element. The source [15] proposes Newton's method or the secant method.

The next stage is to calculate the total flow L_Q of the cascade:

$$L_Q = 2 \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{PC_{iP}[\exp(-Q_i S_P) - 1] + WC_{iW}[\exp(-Q_i S_W) - 1]}{Q_i^2} + \frac{PC_{iP}S_P - WC_{iW}S_W}{Q_i} \right\}. \quad (30)$$

After calculating the total flow, it is possible to plot the distribution of the isotope concentration of a multicomponent mixture over the stages of the cascade.

3. Calculation of Q-cascade parameters

3.1 Calculation of the parameters of the cascade of the first phase of separation

The calculation of the Q -cascade parameters was carried out in the Wolfram Mathematica 13.1 package using a group of operators necessary to search for values using the secant method, in particular, NSolve, FindRoot. Using the package allows you to find all the roots of nonlinear systems of equations with high accuracy. By the method of selection and introduction of restrictions on the imaginary part, one can obtain the only correct solution to the system of equations (28) and (29).

The initial data for the calculation are given in Table 3.

The natural concentration of lead isotopes is taken from the IUPAC report [33] and is shown in Table 4.

Table 3 - Initial data

Chemical element	Targeted isotope	ε	θ	F , kg/s	Estimated concentration C_{206Pb} , %
Pb	^{206}Pb	0,2	0,5	10	95

Table 4 - Natural concentration of lead isotopes

Mass number of the isotope, a.m.u.	Natural concentration, %
204	1,4
206	24,1
207	22,1
208	52,4

Using the methodology presented in Chapter 2, the weighted average mass number, the maximum possible concentration of the target component in the cascade

extraction and waste flow, and dimensionless values M and Q were calculated. The calculation results are presented in Table 5.

Table 5 - Calculated values of the parameters of the cascade of the first stage of separation

\bar{M}	$C_{Pk}^{max},\%$	$C_{Wk}^{max},\%$	$M(^{206}\text{Pb})$	Q_{204}	Q_{206}	Q_{207}	Q_{208}
207,241	94,51	24,44	206,5	0,5	0,1	-0,1	-0,3

The next step is to solve the system of nonlinear equations (28) and (29) to calculate the number of stages in the regenerative and enrichment part of the cascade. Taking into account the maximum allowable concentration of the target isotope calculated above, it is assumed that $C_p=0.9$, $C_w=0.01$. Below is a screenshot of the program, which shows a system of equations for calculating the number of stages in the enrichment and regenerative parts of the cascade (Figure 5).

A change of variables was carried out in order to simplify the system of equations:

$$S_W = \frac{\ln[X]}{Q_i}, \quad (31)$$

$$S_P = \frac{\ln[Y]}{Q_i}. \quad (32)$$

Thus, exponential functions are reduced to polynomials. Additional restrictions are imposed: the roots must be real and greater than 0:

$$\begin{aligned} Re(x) > 0, Re(y) > 0, \\ Im(x) > 0, Im(y) > 0. \end{aligned} \quad (33)$$

As a result of the change of variables, the system of nonlinear equations for calculating the number of stages of the cascade has acquired the following form (Figure 6).

The NSolve and FindRoot operators were applied to this system of equations, which provide a numerical approximation of the solution of the system of equations with a high degree.

During the calculations, a number of roots were obtained (Figure 7).

The above conditions for the roots (33) are satisfied by only one pair (highlighted by a rectangle), therefore, the system has a unique solution. The roots of the system of equations are:

$$X = 30,8002,$$

$$Y = 18,0524.$$

A reverse replacement was performed, as a result of which the number of stages for the enrichment and regenerative parts of the Q -cascade was obtained to obtain highly enriched ^{206}Pb .

$$S_W = \frac{\ln[X]}{Q_i} = \frac{\ln[30,8002]}{0,1} = 34,28,$$

$$S_P = \frac{\ln[Y]}{Q_i} = \frac{\ln[18,0524]}{0,1} = 28,93.$$

Функция для расчета количества ступеней обогатительной части каскада

raditionalForm=

$$(0.241 (1 - e^{0.1 \text{ sw}1})) / \left((e^{-0.1 \text{ sp}1} - e^{0.1 \text{ sw}1}) \left(\frac{0.524 (1 - e^{-0.3 \text{ sw}1})}{e^{0.3 \text{ sp}1} - e^{-0.3 \text{ sw}1}} + \frac{0.221 (1 - e^{-0.1 \text{ sw}1})}{e^{0.1 \text{ sp}1} - e^{-0.1 \text{ sw}1}} + \frac{0.241 (1 - e^{0.1 \text{ sw}1})}{e^{-0.1 \text{ sp}1} - e^{0.1 \text{ sw}1}} + \frac{0.014 (1 - e^{0.5 \text{ sw}1})}{e^{-0.5 \text{ sp}1} - e^{0.5 \text{ sw}1}} \right) \right) - 0.9$$

Функция для расчета количества ступеней регенеративной части каскада

raditionalForm=

$$(0.241 (e^{-0.1 \text{ sp}1} - 1)) / \left((e^{-0.1 \text{ sp}1} - e^{0.1 \text{ sw}1}) \left(\frac{0.014 (e^{-0.5 \text{ sp}1} - 1)}{e^{-0.5 \text{ sp}1} - e^{0.5 \text{ sw}1}} + \frac{0.524 (e^{0.3 \text{ sp}1} - 1)}{e^{0.3 \text{ sp}1} - e^{-0.3 \text{ sw}1}} + \frac{0.221 (e^{0.1 \text{ sp}1} - 1)}{e^{0.1 \text{ sp}1} - e^{-0.1 \text{ sw}1}} + \frac{0.241 (e^{-0.1 \text{ sp}1} - 1)}{e^{-0.1 \text{ sp}1} - e^{0.1 \text{ sw}1}} \right) \right) - 0.01$$

Figure 5 - Screenshot with a system of equations for calculating the number of stages in the enrichment and regenerative parts of the cascade

Функция для расчета количества ступеней
обогащительной части каскада с выполненной заменой

$$-0.9 + (0.241 (1 - x^{1.1})) / \left(\left(-x^{1.1} + \frac{1}{y^{1.1}} \right) \left(\frac{0.014 (1 - x^{5.1})}{-x^{5.1} + \frac{1}{y^{5.1}}} + \frac{0.241 (1 - x^{1.1})}{-x^{1.1} + \frac{1}{y^{1.1}}} + \frac{0.221 \left(1 - \frac{1}{x^{1.1}}\right)}{-\frac{1}{x^{1.1}} + y^{1.1}} + \frac{0.524 \left(1 - \frac{1}{x^{3.1}}\right)}{-\frac{1}{x^{3.1}} + y^{3.1}} \right) \right)$$

Функция для расчета количества ступеней
регенеративной части каскада с выполненной заменой

$$-0.01 + (0.241 \left(-1 + \frac{1}{y^{1.1}}\right)) / \left(\left(-x^{1.1} + \frac{1}{y^{1.1}} \right) \left(\frac{0.014 \left(-1 + \frac{1}{y^{5.1}}\right)}{-x^{5.1} + \frac{1}{y^{5.1}}} + \frac{0.241 \left(-1 + \frac{1}{y^{1.1}}\right)}{-x^{1.1} + \frac{1}{y^{1.1}}} + \frac{0.221 (-1 + y^{1.1})}{-\frac{1}{x^{1.1}} + y^{1.1}} + \frac{0.524 (-1 + y^{3.1})}{-\frac{1}{x^{3.1}} + y^{3.1}} \right) \right)$$

Figure 6 - Screenshot of the system of equations for calculating the number of stages of the cascade after the change of variables

$$\left(\begin{array}{ll} \boxed{x \rightarrow 30.8002} & \boxed{y \rightarrow 18.0524} \\ x \rightarrow 33.4217 - 20.2275 i & y \rightarrow -0.0672604 - 1.55675 i \\ x \rightarrow 33.4217 + 20.2275 i & y \rightarrow -0.0672604 + 1.55675 i \\ x \rightarrow 0.343811 - 0.961182 i & y \rightarrow 0.978752 - 0.0292125 i \\ x \rightarrow 0.343811 + 0.961182 i & y \rightarrow 0.978752 + 0.0292125 i \\ x \rightarrow -0.50025 - 0.880836 i & y \rightarrow 0.953926 - 0.0254252 i \\ x \rightarrow -0.50025 + 0.880836 i & y \rightarrow 0.953926 + 0.0254252 i \\ x \rightarrow -0.843718 - 0.637759 i & y \rightarrow 0.94444 - 0.0180383 i \\ x \rightarrow -0.843718 + 0.637759 i & y \rightarrow 0.94444 + 0.0180383 i \end{array} \right)$$

Figure 7 - Solving the system of equations

When calculating the number of cascade stages in the Wolfram Mathematica 13.1 package, their numbering starts from 0, in reality the stages in the cascade are numbered from 1, so another stage was added to the regenerative part of the cascade. Then, the number of stages in the regenerative and enrichment parts of the cascade:

$$S_W = 34,28 + 1 = 35,28,$$

$$S_P = 28,93.$$

Using formulas (28) and (29), the concentration of isotopes of a multicomponent mixture in the selection flows of light and heavy fractions of the cascade of the first stage of separation was calculated. The data obtained are shown in Table 6.

Table 6 - Concentration of Pb isotopes in the selection flow of light and heavy fractions of the cascade of the first stage of separation

	^{204}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb
Isotope concentration in light fraction manifold, P, %	5,38	90	4,57	$3,42 \cdot 10^{-2}$
Isotope concentration in heavy fraction manifold, W, %	$4,13 \cdot 10^{-8}$	0,91	28,27	70,83

The calculation of the relative error in determining the number of stages in the enrichment and regenerative parts of the cascade of the first stage of separation was carried out:

$$S_P = \frac{28,93 - 28,93}{28,93} \cdot 100\% = 0 \%,$$

$$S_W = \frac{34,28 - 34,2799999999999996}{34,28} \cdot 100\% = 6,93889 \cdot 10^{-16} \%.$$

The error in calculating the number of stages in the concentrator is zero, and in the regenerative part, the error tends to zero, which implies a high accuracy of calculations.

Knowing the concentrations of isotopes in the selection of light and heavy fractions and using formulas (22) and (25), the Q -cascade profile was constructed (Figure 8).

It follows from Figure 8 that the cascade consists of 64.21 stages (35.28 stages in the regenerative part and 28.93 stages in the enrichment part) and the performance at the cascade feed flow stage is approximately 120 g/s.

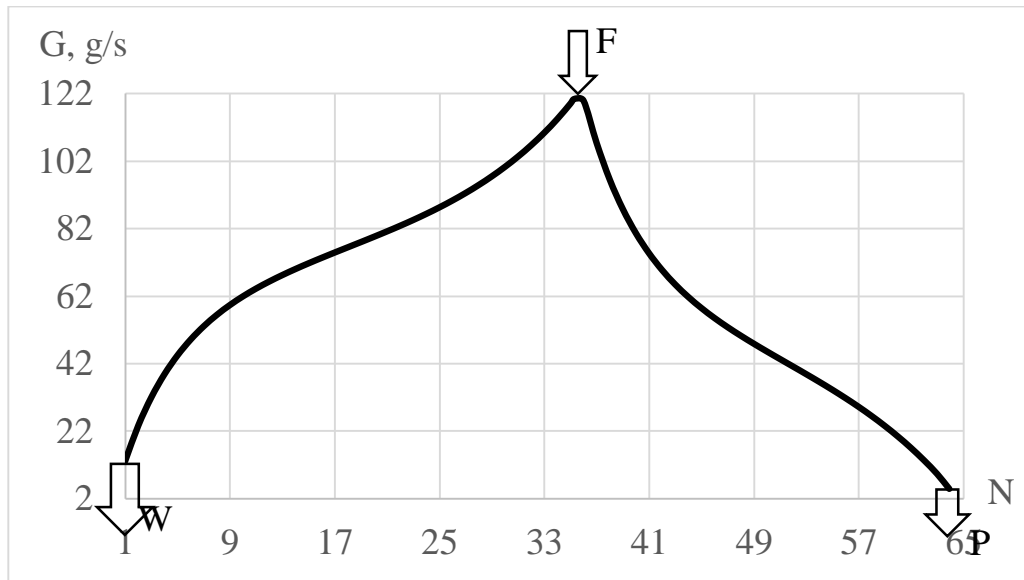


Figure 8 – Cascade profile (phase 1) F is the feed flow, W is the heavy fraction manifold flow, P is the cascade light fraction manifold flow for the first separation phase

To calculate the total flow of the cascade using formulas (23), (24), the extraction flows of the light and heavy fractions of the cascade were calculated.

The total flow and the power flow supplied to the power stage are determined by formulas (23) and (30). The calculation results are presented in table 7.

Table 7 - Values of feed flows, selection of heavy and light fractions of the cascade, total flow of the cascade of the first stage of separation

F, g/s	P, g/s	W, g/s	L _Q , g/s	L _G , g/s
10	2,595	7,405	3961,84	120,46

The next step was to determine the concentration of lead isotopes by stages in the regenerative and enrichment parts of the cascade (Figure 9). The concentration of isotopes in the selection of light and heavy fractions of the cascade are presented in Table 8.

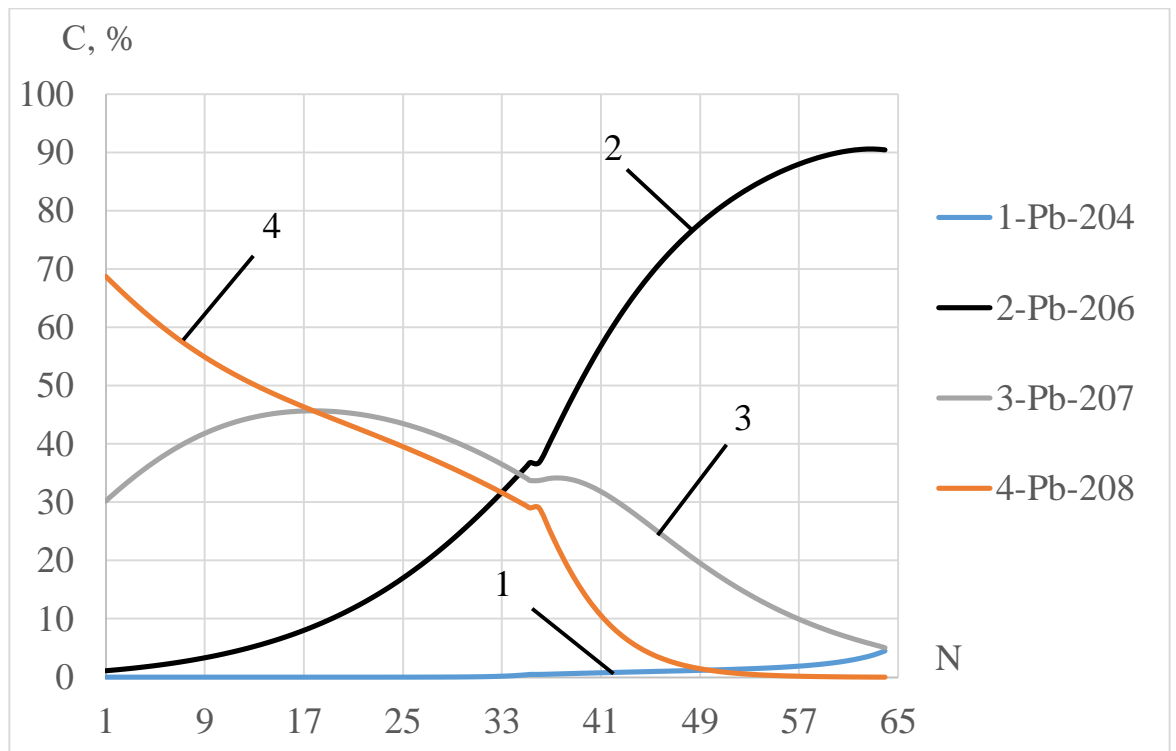


Figure 9 - Change in the concentration of lead isotopes by stages of the cascade of the first phase of separation

Figure 9 shows that ^{206}Pb reaches its maximum concentration at the 63rd stage, $C(^{206}\text{Pb}) = 90.55\%$, and at the stage of light fraction manifold, its concentration is equal to $C(^{206}\text{Pb}) = 90.41\%$. The isotope market requires lead enriched in ^{206}Pb 95-98%, that is, after the first stage of separation, it was not possible to achieve the desired degree of enrichment. Therefore, to obtain a given concentration, it is necessary to carry out the second stage of separation.

Table 8 - Calculated concentration of lead isotopes in the manifold of light and heavy fractions of the cascade of the first phase of separation

	^{204}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb
Isotope concentration in light fraction manifold, P, %	4,47	90,41	5,08	0,04
Isotope concentration in heavy fraction manifold, W, %	0,47	36,78	33,73	29,02

In the selection of the light fraction, the concentration of the target isotope is only 0.14% less than its concentration at the 63rd stage, so there is no need to use the four-v cascade model presented in Chapter 1 in Figure 4. In this case, it is advisable to use the multi-flow separation process model presented in chapter 1 in figure 3.

3.2 Calculation of the parameters of the cascade of the second phase of separation

The use of the model of a multiflow separation process implies the supply of the light fraction manifold flow of the first separation stage, enriched in ^{206}Pb , to feed the second separation stage.

As the initial concentration of isotopes in the feed flow of the second phase, the concentration of these isotopes in the selection of the light fraction of the cascade of the first separation phase, presented in Table 8, was used.

The concentration of ^{206}Pb in the selection of the light fraction for further calculations was taken equal to $C_p=96\%$. When choosing the target isotope concentration in the heavy fraction manifold flow of the cascade, two concentration values $C_{w1}=0,1\%$ and $C_{w2}=0,3\%$ were used in order to select the most economical and efficient separation scheme.

Next, similar calculations of the cascade parameters for the second phase of separation were carried out according to the methodology presented in Chapter 2. The results of calculating the cascade parameters are presented in tables 9, 10, 11, 12 and in figures 10, 11, 12.

Table 9 - Parameter values of the cascade of the second phase of separation

	Cascade 1, $C_w=0,1\%$	Cascade 2, $C_w=0,3\%$
Feed manifold flow, F , kg/s	2,595	2,595
Light fraction manifold flow, P , kg/s	2,455	2,412
Heavy fraction manifold flow, W , kg/s	0,14	0,183

Starting concentration of targeted isotope, %	90,41	90,41
Concentration of targeted isotope in light fraction manifold flow, C_P , %	96	96
Concentration of targeted isotope in heavy fraction manifold flow, C_W , %	0,1	0,3
Parameter M	205,96	205,96
Number of stages in the enrichment part of the cascade, S_P	29,66	33,34
Number of stages in the regenerative part of the cascade, S_W	51,68	38,66
Total flow, L , g/s	1515,42	1615
Feed stage capacity, G_{SW} , g/s	47,69	48,65

Table 10 - Values of isotope concentrations in the flows of light and heavy fractions of Cascade 1 and Cascade 2

	^{204}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb
Isotope concentration in light fraction manifold, P_1 , %	4,72	95	0,28	$5,78 \cdot 10^{-6}$
Isotope concentration in heavy fraction manifold, W_1 , %	$5,01 \cdot 10^{-10}$	9,13	90,12	0,75
Isotope concentration in light fraction manifold, P_2 , %	4,8	95,01	0,19	$1,95 \cdot 10^{-6}$
Isotope concentration in heavy fraction manifold, W_2 , %	$3,34 \cdot 10^{-7}$	27,95	71,47	0,58

The error in calculating the number of stages in the enrichment and regenerative parts of the cascade of the second stage of separation in Cascade 1 and Cascade 2 tends to zero, which confirms the high accuracy of the calculations.

Table 11 - Error values for determining the number of stages in the enrichment and regenerative parts of the cascade of the second phase of separation in Cascade 1 and Cascade 2

	$S_p, \%$	$S_w, \%$
Cascade 1	$1,11022 \cdot 10^{-14}$	$1,11022 \cdot 10^{-14}$
Cascade 2	0	$1,33227 \cdot 10^{-13}$

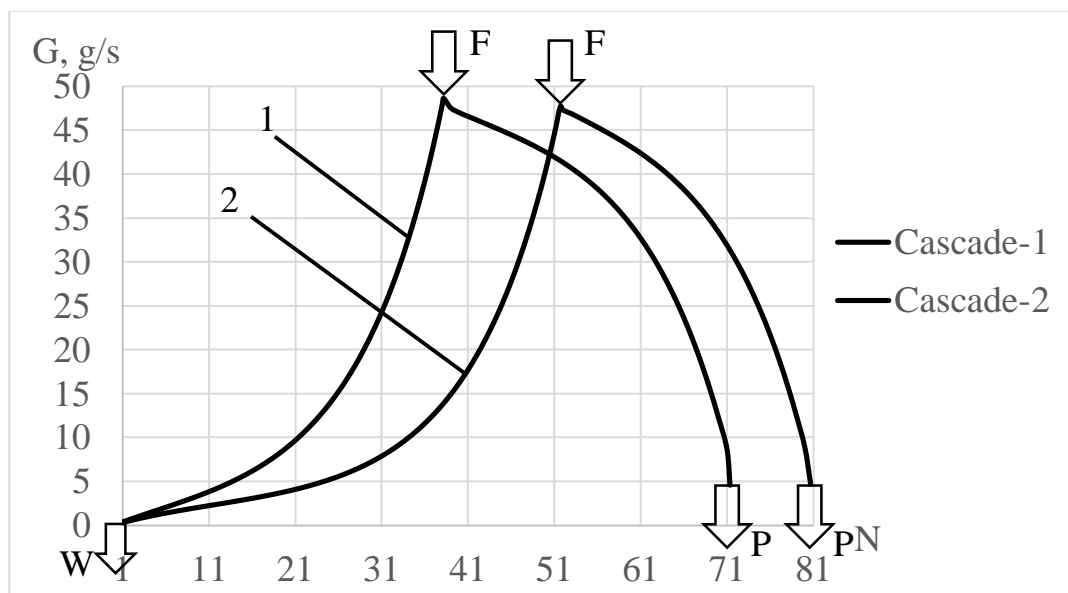


Figure 10 - Profiles of Cascade 1 with $C_w=0.1\%$ and Cascade 2 with $C_w=0.3\%$ for the second phase of separation

Figure 10 shows that Cascade 1, with $C_w=0.1\%$, consists of 81,34 stages, and Cascade 2 with $C_w=0.3\%$ consists of 72 stages, while the performance of these cascades at the power supply stages is practically the same and equals to approximately 50 g/s. The number of stages in the regenerative and enrichment parts of the cascades differs, for the enrichment part the difference is insignificant, in Cascade 2 it is 3.68 steps more, in the regenerative part of Cascade 1 it has 13.02 more steps.

Table 9 shows that the flow of selection of the light fraction in Cascade 1 is 0.043 g/s more than in Cascade 2, that is, it is insignificant. Therefore, Cascade 2,

from the point of view of obtaining the target isotope, is more economically preferable.

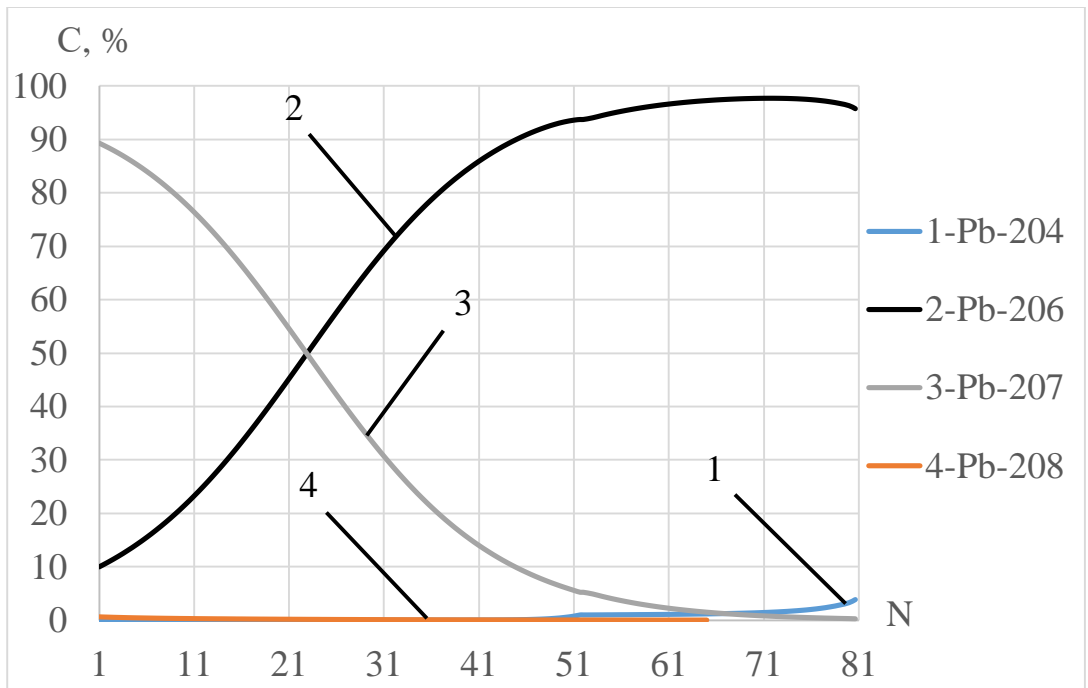


Figure 11 - Change in the concentration of lead isotopes by stages of Cascade 1 for the second phase of separation

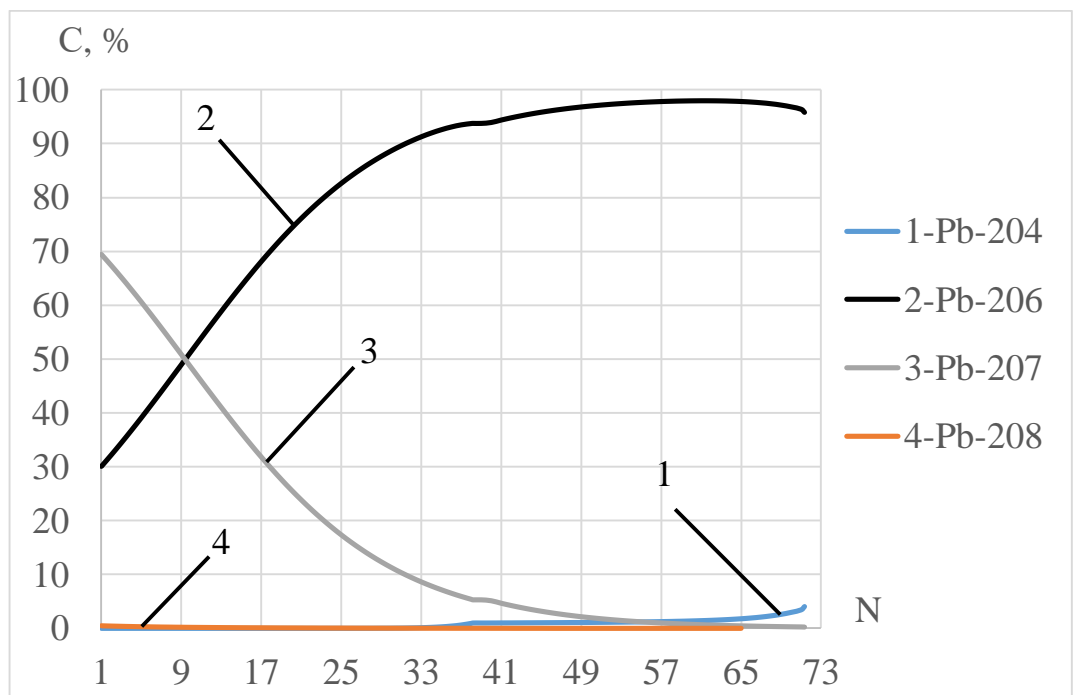


Figure 12 - Change in the concentration of lead isotopes by stages of Cascade 2 for the second phase of separation

Table 12 - Concentrations of lead isotopes in the manifold flow of light and heavy fractions of Cascade 1 and Cascade 2 after the second phase of separation

	²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb
Isotope concentration in light fraction manifold, P ₁ , %	3,93	95,76	0,31	7,13·10 ⁻⁶
Isotope concentration in heavy fraction manifold, W ₁ , %	6,77·10 ⁻¹⁰	10,01	89,32	0,67
Isotope concentration in light fraction manifold, P ₂ , %	4,0	95,79	0,21	2,98·10 ⁻⁶
Isotope concentration in heavy fraction manifold, W ₂ , %	4,42·10 ⁻⁷	30,02	69,47	0,51

From Figures 11 and 12 and Table 12 it follows that the concentration of the target isotope in the light fraction manifold flow of Cascade 1 and Cascade 2 is almost the same: $C_{P1}=95.76\%$ and $C_{P2}=95.79\%$, respectively. In Cascade 1, the maximum concentration is reached at stage 72, $C_{P1}=97.7\%$, in Cascade 2 - at stage 61 $C_{P2}=97.94\%$.

Thus, it has been shown that in Cascade 1 and Cascade 2, the specified concentration of the target isotope (above 95%) is reached at the second stage of separation. At the same time, in the manifold of the heavy fraction of Cascade 1, it is additionally possible to obtain highly enriched ²⁰⁷Pb with a concentration of $C_W=89.32\%$. When using Cascade 2, the concentrations of non-target isotopes are much lower, as is the number of stages in the regenerative part of the cascade.

Cascade 2 has an economic advantage in terms of obtaining the targeted isotope. Cascade 1 makes it possible to additionally obtain highly enriched lead-207, which can be used in reactor control and protection systems, to create lead isotope standards used in the search for uranium deposits and to determine the age of rocks.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является получение расчёта параметров Q -каскада по получению высокообогащенного свинца-206, с позиции ресурсоэффективности и конкурентоспособности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Определить потенциальных потребителей результатов исследования.

Провести анализ конкурентных технических решений.

Выполнить SWOT-анализ: описать сильные и слабые стороны проекта, выявить возможности и угрозы для реализации проекта.

Оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации.

Построить календарный план-график проведения работ научно-исследовательского проекта.

Рассчитать бюджет научного исследования.

Определить ресурсную, финансовую эффективности исследования.

В работе необходимо дать комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы, по изучению процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций, и оценить полные затраты на исследование (проект), а также дать приближённую экономическую оценку результатов ее внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы.

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

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Главное преимущество теоретического математического моделирования – это возможность получения технологических параметров,

при которых будет рассчитаны оптимальные характеристики разделительного каскада. Расчётная модель позволяет также избавиться от многочисленных экспериментов и крупных финансовых затрат на их реализацию. Исходя из этого конкурентами разработанной модели являются:

Экспериментальные исследования в области оптимизации разделительного каскада по получению высокообогащенного ^{206}Pb ;

Теоретический расчёт параметров с применением других модельных каскадов (*R*-каскад, *X*-каскад).

Оценочная карта анализа разработанной модели, по которой был рассчитан *Q*-каскад, представлена в таблице 4.1.

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{Φ}	B_{K1}	B_{K2}	K_{Φ}	K_{K1}	K_{K2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Удобство эксплуатации	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
3. Экономичность	0,03	5	2	3	0,15	0,06	0,09
4. Надежность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
5. Закрытость получаемых данных	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Потребность в материальных ресурсах	0,05	5	1	4	0,25	0,05	0,2
7. Стабильность	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
8. Доступность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность метода	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
2. Затраты на разработку	0,12	5	1	3	0,6	0,12	0,36
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
4. Финансирование разработанного метода	0,1	5	1	3	0,5	0,1	0,3
Итого	1	60	35	40	5	2,92	3,25

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

4.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 4.2.

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надёжность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.3–4.6.

Таблица 4.2 - SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта: С1. Актуальность проекта. С2. Применение современного оборудования на стадии расчета С3. Бюджетное финансирование С4. Получение результатов высокой точности. С5. Возможность оптимизации расчётной модели.</p>	<p>Слабые стороны проекта: Сл1. Ограниченное применение конкретной модели. Сл2. Требуется экспериментальное подтверждение результатов. Сл3. Закрытость программного кода. Сл4. Ограниченный круг потребителей. Сл5. Ограниченные возможности расчёта (только для определенных компонентов).</p>
<p>Возможности: В1. Использование модели для исследований.</p>	<p>1. Полное обеспечение условий для создания и применения модели для расчётов. 2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью</p>	<p>1. Необходимо экспериментальное подтверждение, что возможно реализовать в условиях вуза.</p>

<p>В2. Расширение возможностей расчётной модели.</p> <p>В3. Возможность исследования различных изотопов свинца</p> <p>В4. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>	<p>тематики и использованием современных расчётных моделей.</p> <p>3. Высокая точность получаемых результатов расчета распределения концентраций по ступеням позволяет повысить спрос на расчётную модель</p>	<p>2. Закрытость расчётной модели не отражается на точности результатов.</p> <p>3. Круг потребителей можно увеличить с помощью увеличения количества элементов.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Низкий спрос со стороны предприятий.</p> <p>У2. Вероятность разработки подобных расчётных моделей другими организациями.</p> <p>У3. Сложность в продвижении модели среди консервативно настроенных предприятий.</p> <p>У4. Разработка новейших моделей расчёта.</p>	<p>1. Внедрение разработки в научные центры и институты позволит увеличить обхват пользователей и, следовательно, заинтересованность предприятий.</p> <p>2. Благодаря возможностям расчётной модели и своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным.</p> <p>3. Так как существует возможность оптимизации расчётной модели и расширения выбора изотопов, то это позволит конкурировать с новейшими разработками.</p> <p>4. Дополнительное финансирование позволит продвинуть расчётную модель на рынок.</p>	<p>1. Создание подобных моделей другими организациями можно решить с помощью возможностей расчётной модели, которых нет у конкурентов.</p> <p>2. Несовершенство разработанной модели можно решить с помощью оптимизации модели под требуемые изотопы.</p>

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

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

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
В1	+	-	-	-	+
В2	+	-	-	-	+
В3	-	+	+	+	+
В4	-	-	+	+	-

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

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

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
У1	+	+	0	+	+
У2	-	-	+	0	0
У3	+	+	0	+	+
У4	-	-	+	0	-

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества разработанной модели расчета Q -каскада, такие как: корректность, точность получаемых данных, возможность оптимизации разделительного процесса, экономичность, стабильность модели, доступность, удобство эксплуатации, возможность получения данных «здесь и сейчас» значительно преобладают над её недостатками (небольшой круг

потребителей, закрытость). Отрицательный эффект от влияния слабых сторон или угроз возможно снизить, если внедрить модель расчета Q -каскада на производства и научные центры ядерной промышленности.

4.2 Планирование научно-исследовательского проекта

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта и исполнитель - студент. После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Календарное планирование работ	Руководитель, студент
	4	Изучение возможностей расчётной модели	Студент
Освоение методики расчёта на практике	5	Проведение расчётов	Студент
	6	Анализ полученных данных	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	7	Составление пояснительной записки	Студент
	8	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент
	9	Подготовка к защите	Студент

4.2.2 Определение трудоёмкости выполнения работ

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

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

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}$$

Исходя из ожидаемой трудоёмкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}$$

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из

рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{\text{кал}}$$

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Временные показатели проведения НИР

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		$t_{\text{ож}}$, чел-дни					
	Ис п 1	Ис п 2	Ис п 1	Ис п 2	Ис п 1	Ис п 2	Исп 1	Исп 2	Исп 1	Исп 2
Составление и утверждение технического задания	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Подбор и изучение материалов по теме	1	-	3	-	1,8	-	1	-	1	-
Календарное планирование работ	5	5	7	7	5,8	5,8	6	6	9	9
Изучение возможностей расчётной модели	1	-	2	-	1,4	-	1	-	2	-
Проведение расчётов	25	-	40	-	31	-	16	-	23	-
Анализ полученных данных	1	1	3	3	1,8	1,8	2	2	3	3
Составление пояснительной записки	20	-	30	-	24	-	24	-	35	-
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	1	2	2	1,4	1,4	1	1	1	1
Подготовка к защите	7	-	14	-	9,8	-	10	-	14	-

На основе данной таблицы строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблицы 4.9 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работы	Исполнители	Т _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Февр		Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель (красный)	1													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент (синий)	9													
3	Календарное планирование работ	Руководитель студент (зеленый)	1													
4	Изучение возможностей расчётной модели	Студент	2													
5	Проведение расчётов	Студент	23													
6	Анализ полученных данных	Руководитель студент	3													
7	Составление пояснительной записки	Студент	35													
8	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель студент	1													
9	Подготовка к защите	Студент	14													

4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научного исследования учитывается полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета НИИ используется следующая группировка затрат по статьям:

1. материальные затраты НИИ;
2. затраты на специальное оборудование;

3. амортизационные отчисления;
4. основная заработная плата исполнителей;
5. дополнительная заработная плата исполнителей;
6. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
7. накладные расходы.

4.3.1 Расчёт материальных затрат

В данную статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей 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, м² и т.д.);

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

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (3-5% от стоимости материалов).

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров.

Затраты на электроэнергию для работы ПЭВМ рассчитываются по формуле:

$$Z_M = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 3,16 \cdot 0,5 \cdot 800 = 1264,$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (3,16 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

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

Затраты на электроэнергию составили 1264 рубля.

4.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных работ

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

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

Где: n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot t$$

где, I – итоговая сумма, тыс. руб.; t – время использования, мес.

Затраты на амортизацию оборудования приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Персональный компьютер (ноутбук)	1	4	30	30
Итого		30 тыс. руб.			

Рассчитывается норма амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 4 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{4} = 0,25$$

Общая сумма амортизационных отчислений (по формуле 4.7):

$$A = \frac{H_{AI}}{12} \cdot m = \frac{0,25 \cdot 30000}{12} \cdot 12 = 7500 \text{ руб.}$$

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме и дополнительная заработная плата научно-производственного персонала. Баланс рабочего времени представлен в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	66	1118
Потери рабочего времени	56	28
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	219

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

оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

иные выплаты: районный коэффициент.

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

Исполнителем является инженер-исследователь Романис М.Е., оклад инженера составляет 13786 руб. (без учета РК).

Для расчета месячного должностного оклада работника применяется формула:

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

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

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

k_d – коэффициент доплат и надбавок, составляет примерно 0,2-0,5;

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

Результаты представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_{mc}	k_{np}	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	32566	0,3	0,2	1,3	63503,7	2717,9	6	16307,4
Романис М.Е.	13786	-	-	1,3	18070	1191,5	88	104852
Итого по статье								121159,4

4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн},$$

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

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

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

В таблице 4.13 приведен расчет основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.13 – Заработная плата исполнителей ВКР

Заработная плата	Руководитель	Романис М.Е.
Основная зарплата $Z_{осн}$, руб.	16307,4	104852
Дополнительная зарплата $Z_{доп}$, руб.	2283	14679,7
Итого по статье $Z_{зн}$, руб	18590,4	119531,3
Итого	138121,7	

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot 138121,7 = 41436,5 \text{ руб.}$$

4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование

материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

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

Величину коэффициента накладных расходов $k_{\text{нр}}$ можно взять в размере 16%.

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (1264 + 41436,5 + 121159,4) = 26217,6 \text{ руб.}$$

4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

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

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

Определенная себестоимость проекта составляет 207039,8 руб., а время, необходимое для ее выполнения 89 календарных дней.

Таблица 4.14 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	1264
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	121159,4
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	16962,3
4. Отчисления во внебюджетные фонды	41436,5
5. Накладные расходы	26217,6
Общие затраты исполнителя	205775,8
Общий бюджет затрат исследования	207039,8

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

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

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{207039,8}{500000} = 0,41$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{360565,4}{500000} = 0,72$$

Исполнение 1 соответствует данной разработке, исполнение 2 – аналогичной. За максимальную стоимость исполнения взята гипотетическая стоимость проекта при максимальных ценах на все составляющие бюджета.

Полученная величина интегрального финансового показателя проекта отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки, т.к. полученное значение для разных исполнителей не превышает единицы.

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

В таблице 4.15 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Таблица 4.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования / Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2
Точность вычислений	0,25	5	4
Скорость произведения расчетов	0,1	4	3
Удобство в эксплуатации	0,15	5	5
Визуализация результатов	0,2	5	5
Экономия средств	0,3	5	5
Итого	1	4,8	4,4

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 = 5;$$

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 = 4,55.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}},$$

$$I_{исп.1} = \frac{5}{0,41} = 12,2$$

$$I_{исп.2} = \frac{4,55}{0,72} = 6,32$$

С целью определения наиболее целесообразного варианта из предложенных сравним интегральные показатели эффективности вариантов исполнения разработки и определим сравнительную эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}$$

где \mathcal{E}_{cp} – сравнительная эффективность проекта; $I_{фин}^p$ – интегральный показатель разработки; $I_{фин}^{ai}$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

В таблице 4.16 представлена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 4.16 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатель	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,41	0,72
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	5	4,55
3	Интегральный показатель эффективности	12,2	6,32
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,93	

Сравнив значения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что реализация НИР в первом исполнении является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности, т.к в первом исполнении требуется меньше времени для проведения исследования, а следовательно меньше затрат на заработную плату исполнителя.

Выводы по разделу ”Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение”

На основе проведенного анализа сделаем следующие выводы:

1. Согласно анализу конкурентных технических решений установлено, что конкурентные методы имеют ряд недостатков, исключаемых разработанной моделью. Ранее разработанная сотрудниками ОЯТЦ модель позволяет существенно снизить финансовые затраты, обеспечивает высокую точность расчетных значений и имеет высокий потенциал развития в дальнейшем.

2. В ходе планирования научно-исследовательских работ определен перечень работ, выполняемый рабочей группой. В данном случае рабочая группа состоит из двух человек: руководитель (профессор) и студент (Романис М.Е.). На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, построенный на основе диаграммы Ганта, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – это составление пояснительной записки.

3. Бюджет исследования составил 207039,8 руб. Он состоит из материальных затрат (1264 руб.), затрат на оплаты труда (138121,7 руб.), отчислений во внебюджетные фонды (41436,5 руб.) и накладных расходов (26217,6 руб.).

4. Произведена сравнительная характеристика эффективности разработки на основании интегрального показателя эффективности. Реализация проекта в первом исполнении является более эффективным вариантом.

5. Социальная ответственность

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор – фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

В работе проводится расчет Q-каскада по получению высокообогащенного свинца-206. Результаты проведенных исследований

могут быть использованы для работы на предприятиях по разделению изотопов.

Расчеты проводились с помощью пакета Wolfram Mathematica, и в среде Microsoft Office. Исследования проводились в аудитории № 246 10 корпуса Томского политехнического университета, при этом использовалась персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ).

В разделе рассмотрены опасные и вредные факторы, оказывающие влияние на процесс исследования, рассмотрены воздействия исследуемого объекта на окружающую среду, правовые и организационные вопросы, а также мероприятия в чрезвычайных ситуациях.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации [35]. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;

- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В [35] говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации [36]. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

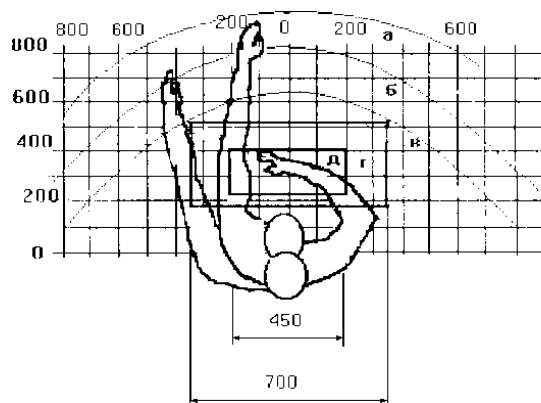


Рисунок 5.1 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

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

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация:

- в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе;
- в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно [36].

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

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

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше – если угол обзора будет составлять 30°.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 ° [36].

В лаборатории № 246 10 корпуса ТПУ полностью выполняются установленные нормы [36].

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

На работника лаборатории, проводящего экспериментальные исследования, могут воздействовать следующие факторы:

- физические;
- химические;
- психофизиологические;
- биологические [37].

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

Таблица 5.1 - Возможные опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с химическими реактивами.	Химические вредные вещества.	–	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества [38]. МУ 2.6.5.033-2017 Организация вентиляции на радиационно опасных предприятиях (производствах) госкорпорации "Росатом" [43]
Работа на плазменной установке.	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.).	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [39], СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона [40].
		Пожарная опасность	ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность [41].
Расчёт данных на ЭВМ.	Шум, вибрация, микроклимат; воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.).	Электрический ток	СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [42], ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [39].

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

- умственное напряжение;
- физические перегрузки.

Биологические и химические вредные производственные факторы в лаборатории № 246 10 корпуса ТПУ отсутствуют.

5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов

В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03) они должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ должна составлять не менее 6 м² [39].

5.2.3 Отклонение показателей микроклимата

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с нормами и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Оптимальные параметры микроклимата

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

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений.

Вентиляция — процесс удаления отработанного воздуха из помещения и замена его наружным. Система вентиляции обеспечивает отток и приток воздуха в помещении. Вентиляция обеспечивает санитарно-гигиенические условия (температуру, относительную влажность, скорость движения воздуха и чистоту воздуха) воздушной среды в помещении, благоприятные для здоровья и самочувствия человека, отвечающие требованиям санитарных норм, технологических процессов, строительных конструкций зданий, технологий хранения и т. д.

Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. Оптимальная кратность воздухообмена в производственных помещениях находится в достаточно широких пределах: от 3 до 40 ч⁻¹ [37].

Таким образом, установлено, что микроклимат в используемой лаборатории №246 10 учебного корпуса ТПУ соответствует оптимальным условиям работы [37, 43].

5.2.4 Превышение уровня шума

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. В нашем случае источником шума является откачивающий компрессор. Шум компрессора высокочастотного генератора используемой установки не превышает 75 дБ, что так же соответствует санитарным нормам [42].

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

Таблица 5.3 - Нормативы уровня шума при различных видах работ

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

В лаборатории №246 10 учебного корпуса ТПУ уровень шума соответствует санитарным нормам [42].

5.2.5 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц – 2кГц – 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц – 400кГц – 2,5В/м.
- плотность магнитного потока должна быть не более:
- в диапазоне частот 5Гц – 2кГц – 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц – 400кГц – 25нТл [40].

Существуют следующие способы защиты от действия электромагнитного излучения:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя) [40].

Установлено, что в лаборатории №246 10 учебного корпуса ТПУ уровень электромагнитного излучения соответствует санитарным нормам [40].

5.2.6 Недостаточная освещенность рабочей зоны

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

По нормативам освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [37].

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не

менее 40°. Коэффициент запаса (Кз) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5 %.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться:

- системой общего равномерного освещения.
- В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы:
 - комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники;
 - местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов) [37].

Площадь помещения:

$$S = a \cdot b,$$

где А – длина, м; В – ширина, м.

$$S = 4 \text{ м} \cdot 5 \text{ м} = 20 \text{ м}^2,$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c = 50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{\text{п}} = 70\%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_z = 1.5$. Коэффициент неравномерности для светодиодных лент $Z = 1,1$.

Выбираем светодиоды Varton 9w, световой поток которых равен $\Phi_{\text{лд}} = 2900$ Лм.

Выбираем светильники со светодиодами типа Diora LPO. Этот светильник имеет две светодиодные ленты мощностью 9 Вт каждая, длина светильника равна 1260 мм, ширина – 124 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для светодиодных светильников с защитным

рассеивателем лежит в диапазоне 1,1 – 1,3. Принимаем $\lambda=1,1$ расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,5$ м

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

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

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

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p = 3,5 - 1 - 0,5 = 2 \text{ м.}$$

Из формулы

$$\Phi_{л} = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta};$$

находим число светодиодных лент N

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_{л} \cdot \eta};$$

η определяем через индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{(a \cdot b)}{(a + b)} = \frac{4 \cdot 5}{2 \cdot (4 + 5)} = 1,1.$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа Dioga со светодиодными лентами при $\rho_c = 50\%$, $\rho_{п} = 70\%$ и индексе помещения $i = 1,1$ равен $\eta = 0,45$.

Тогда

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_{л} \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2900 \cdot 0,45} = 7,59 \text{ лент.}$$

Принимаем количество светодиодных лент 8. При этом получается 4 светильника, т.е. 2 ряда по 2 светильника.

Потребный световой поток светодиодных ламп:

$$\Phi_{л} = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,45} = 2750 \text{ Лм.}$$

Из условий равномерности освещения определяем расстояния L_1 и $\frac{L_1}{3}$, L_2 и $\frac{L_2}{3}$ по следующим уравнениям:

$$4000 = L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + 2 \cdot 124; L_1 = 2251 \text{ мм}, \frac{L_1}{3} = 750 \text{ мм};$$

$$5000 = L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_2 + 2 \cdot 1260; L_2 = 1488 \text{ мм}, \frac{L_2}{3} = 496 \text{ мм};$$

На рисунке 5.2 изображен план помещения и размещения светильников со светодиодными лентами в аудитории №246 10 корпуса НИ ТПУ.

Делаем проверку выполнения условия:

$$\frac{-10\% \leq (\Phi_{лд} - \Phi_{л})}{\Phi_{лд}} \cdot 100\% \leq 20\%$$

$$\frac{(\Phi_{лд} - \Phi_{л})}{\Phi_{лд} \cdot 100\%} = \frac{(2900 - 2750)}{2900} \cdot 100\% = 5,71\%$$

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

$$P = 8 \cdot 9 = 72 \text{ Вт}$$

Расчётное количество светильников соответствует фактически установленному в аудитории №246 10 корпуса НИ ТПУ.

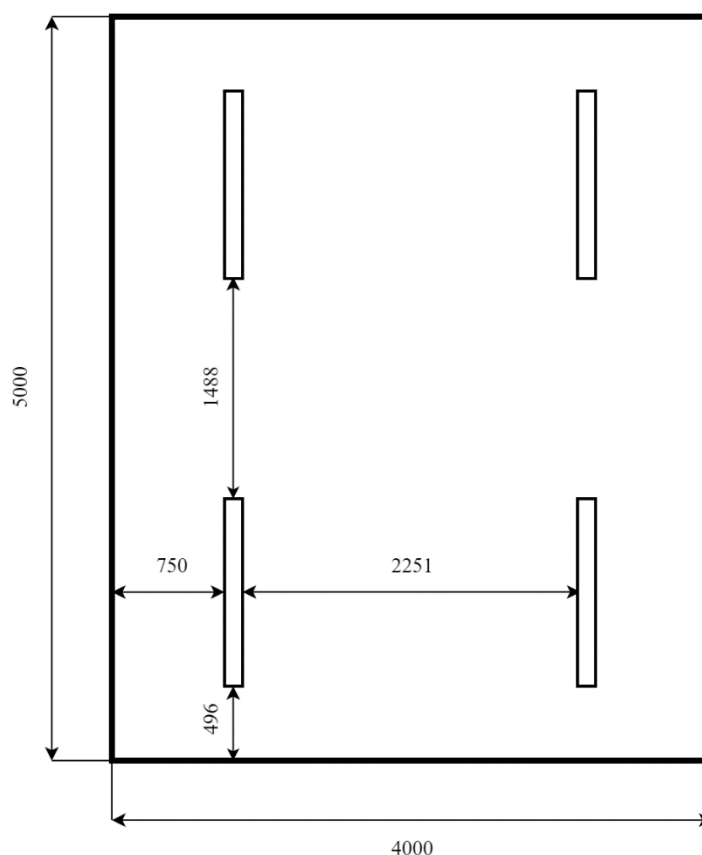


Рисунок 5.2 - План помещения и размещения светильников со светодиодными лентами

5.2.7 Электробезопасность

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрических приборов;

- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции) [39];

Мероприятия по обеспечению электробезопасности установок:

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

- вывешивание плакатов, указывающих место работы;

- заземление корпусов всех установок через нулевой провод; покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклЮчение в корпус токоведущих и электропоражающих частей) [39].

Электрозщитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;

- изолирующие устройства и покрытия;

– устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;

– устройства дистанционного управления;

– предохранительные устройства и др.

Классификация помещений по электробезопасности приведена в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Классификация помещений по электробезопасности

Категория	Расшифровка	Критерии
	Помещения без повышенной опасности	<ul style="list-style-type: none">- Влажность не более 75 %- Работаящая приточно-вытяжная вентиляция- Температура не выше 35 °С- Материал покрытия пола не проводит электричество
	Помещения с повышенной опасностью	<ul style="list-style-type: none">- Влажность более 75 %- В воздухе возможно наличие токопроводящей пыли- Высокое содержание в воздухе химических соединений- Материал пола способен проводить электричество- Высокая температура
	Особо опасные	<ul style="list-style-type: none">- Особо сырые, влажность воздуха 100 %- Помещения с активной химической или органической средой- Наличие сразу двух факторов, относящихся к условиям повышенной опасности
	Территории с открытыми электроустановками	<ul style="list-style-type: none">- Наличие открытого распределительного устройства (ОРУ)

Из таблицы 5.4 можно видеть, что лаборатория № 246 10 учебного корпуса ТПУ относится ко 1-ой категории.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен

быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год [37].

5.2.8 Психофизиологические факторы

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

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

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [37].

В ходе выполнения работа в лаборатории №246 10 учебного корпуса ТПУ руководителем организованы все необходимые мероприятия для нивелирования психофизических факторов.

5.2.9 Пожарная и взрывная безопасность

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

Возможные причины возгорания [41]:

- работа с открытой электроаппаратурой;
 - короткие замыкания в блоке питания;
 - несоблюдение правил пожарной безопасности;
 - наличие горючих компонентов.
- Наиболее опасным с точки зрения пожарной безопасности веществом, применяемым при работе, является этанол.

Все работы с этанолом должны проводиться с использованием приточно-вытяжной вентиляции вдали от огня и источников искрообразования. При отборе проб, проведении анализа и обращении в процессе транспортных и производственных операций с этанолом применяются индивидуальные средства защиты по нормам выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств защиты, утвержденным в установленном порядке.

Для тушения горящего этанола применяют порошковые огнетушители, средства объемного тушения (минимальная огнетушащая концентрация: углекислого газа – 29 % (по объему), азота – 43 % (по объему), дибромтетрафторэтана – 2,1 % (по объему), песок, асбестовое одеяло и пену [41].

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные [41].

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации [41].

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования [37].

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [37]:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

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

При возникновении аварийной ситуации необходимо [41]:

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

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

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

Аварийная ситуация (АС) — сочетание условий и обстоятельств, создающих угрозу возникновения аварий и других происшествий, которые могут привести к взрыву, пожару, отравлению, гибели или травмированию (заболеванию) людей, животных, потерям материальных ценностей.

При проведении исследования наиболее вероятной ЧС является пожар. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. В таблице 6 рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы по их предотвращению и ликвидации их последствий.

Таблица 5.5 – Чрезвычайные ситуации, методы предотвращения и ликвидации последствий

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

Выводы по разделу «социальная ответственность»

В данной главе проведен анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте в лаборатории № 246 10 корпуса ТПУ при проведении исследований:

- микроклимат [37, 43];
- шум [42];
- электромагнитное излучение [40];
- освещенность [37];
- психофизиологические факторы [37];
- электробезопасность [39];
- пожаро-взрывобезопасность [41].

Помещение № 246 10 корпуса ТПУ отнесено:

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

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

Conclusions

1. The profiles of the corresponding Q -cascades and the dependence of the distribution of the concentration of lead isotopes over the stages of the cascades of the first and second stages of separation have been calculated. It is shown that lead isotopes are distributed over the stages of cascades in accordance with their mass numbers. The largest change in the concentration of lead isotopes takes place at the end stages of the cascades, the smallest - near the feed flow stage.

2. When calculating the parameters of the Q -cascade, it was found that it is impossible to obtain the required concentration of ^{206}Pb in one phase of separation. The maximum concentration of the target isotope in the first phase of separation is 90,41% at the stage of the light fraction manifold flow of the cascade.

3. At the second stage of separation, using a multiframe scheme, Cascade 1 and Cascade 2 were calculated with the concentration of the targeted isotope in the heavy fraction manifold flow of 0.1% and 0.3%, respectively. It is shown that in Cascade 1 and Cascade 2, the specified concentration of the targeted isotope (above 95%) is reached at the second phase of separation. At the same time, in the manifold of the heavy fraction of Cascade 1, it is additionally possible to obtain highly enriched ^{207}Pb with a concentration of $C_W=89.32\%$. Cascade 2 is economically more profitable, since it has 13,02 steps less than Cascade 1 in the regenerative part, but the concentration of non-targeted isotopes and degree of extraction in it is much lower than in Cascade 1.

The results can be used in the gas centrifuge technology for the separation of multicomponent isotope mixtures at separation plants in Russia.

Список используемых источников

1. Н. В. Марченко, Е. П. Вершинина, Э. М. Гильдебрандт. *Металлургия тяжелых цветных металлов.* - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2009. - 394 с.
2. Индык Д.В. *Получение стабильных изотопов свинца при химической переработке изотопно-обогащенного тетраметилсвинца: дис. канд. техн. наук: 05.17.01.* - Томск, 2018. - 135 с.
3. Catanzaro, E. J. Absolute isotopic abundance ratios of common, equal-atom and radiogenic lead isotopic standards / E. J. Catanzaro, T. J. Murphy, W. R. Shields, E. L. Garner // *J. Res. Natl. Bur. Stand.* – 1968. – V. 72A. – № 6. – pp. 261-267.
4. Изотопы свинца // ЭХЗ Росатом URL: <https://www.ecp.ru/activity/nuclear/iztps-plumb> (дата обращения: 08.02.2023).
5. Баранов, В. Ю. *Изотопы: свойства, получение, применение.* / В. Ю. Баранов. М.: Физматлит, 2005. – 2 т. – 727 с.
6. Б.Ф.Громов, О.Г.Григорьев, А.В.Дедуль, А.В.Зродников, Г.И.Тошинский, В.И.Читайкин. *Использование технологии судовых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем в гражданской ядерной энергетике России.* В сб.: *Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях*, Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 1999, т.1, С. 44-51.
7. E.Greenspan, D.C.Wade. *Encapsulated Nuclear Reactor Heat Source Module.* *Transactions of the American Nucl. Society*, 1999. V.80, pp. 197-198.
8. Хорасанов Г.Л., Блохин А.И. *Высокообогащенный свинец-206 для малой энергетики..* - Обнинск: Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского, 2001
9. Fleischer, H. Tetramethyllead (IV) at 150 K / H. Fleischer, S. Parsons, C. R. Pulham // *Acta Cryst.* –2003. – V59. – pp. 11-13.
10. Seyferth, D. The rise and fall of tetraethyllead. 2 / D. Seyferth // *Organometallics* 2003. – 22 (25). – pp. 5154-5178.

11. Gilman, H. Reactions of metallic thallium and metallic lead with organic halides / H. Gilman, R. G. Jones // *J. Amer. Chem. Soc.* – 1950. – 72. – pp. 1760-1761.
12. Richards, J. R. Isotopic composition of Australian leads I. Preparation of tetramethyl lead samples // *Microchimica Acta.* – 1962. – pp. 620-627.
13. Андрианов, К. А. Технология элементоорганических мономеров и полимеров / К. А. Андрианов, Л. М. Хананашвили. – М.: Химия, 1973. – 325 с.
14. Borisevich V.D. New approach to optimize Q-cascades / V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze, S. Zeng // *Chemical Engineering Science.* – 2011. – Vol. 66. – P. 393-396.
15. Многокомпонентный разделительный потенциал: по следам Дирака / В.М. Гадельшин, О.Е. Александров, В.Д. Селезнев [и др.]. // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 4-9.
16. Орлов А.А. Разделение многокомпонентной изотопной смеси в процессе заполнения каскада газовых центрифуг / А.А. Орлов, А.А. Ушаков, В.П. Совач // *Известия вузов: Ядерная энергетика.* – 2019. – С. 75-87. DOI 10.26583
17. Смирнов А.Ю. Q-каскады для получения высоких концентраций промежуточных компонентов разделяемых смесей / Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. // *Теоретические основы химической технологии.* – 2013. – Т. 47, № 4. – С. 441-446.
18. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей. Учебное пособие. / В.Д. Борман, Г.А. Сулаберидзе, В.А. Палкин, В.Д. Борисевич [и др.]; Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”. – Москва: Изд-во МИФИ, 2011. – 368 с. – ISBN 978-5-7262-1527-3.
19. Borisevich V.D. Separation of multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge / V.D. Borisevich, E.V. Levin // *Separation science and technology.* – 2001. – Vol. 36, № 9. – P. 1697-1735.

20. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей. Учебное пособие. / В.Д. Борман, Г.А. Сулаберидзе, В.А. Палкин, В.Д. Борисевич [и др.]; Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”. – Москва: Изд-во МИФИ, 2011. – 368 с. – ISBN 978-5-7262-1527-3.
21. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 частях. Часть 2 / В.Ю. Баранов, Б.М. Андреев, Д.Г. Арефьев [и др.] – Москва: Физматлит, 2005. – 600 с. – ISBN 5-9221-0522-1.
22. Levin E.V. Separation of multicomponent isotopic mixtures an a gas centrifuge - approximate method for solving the system of diffusion-transport equations and analysis of some separation characteristics / E.V. Levin // Atomic Energy. – 1994. – Vol. 77, № 4. – pp. 760-767.
23. Палкин В.А. Аналитические оценки содержания изотопов слабообогатщенного регенерированного урана в многопоточных оптимальных каскадах / В.А. Палкин, Е.В. Маслюков // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107, №. 6. – С. 345–347
24. Adelstein S.J. Isotopes for Medicine and Life Science / S.J. Adelstein, F.J. Manning. // National Academy Press, – 1995. – Vol. 23. – pp. 144-146.
25. Application of stable isotopes in Russian Federation / V.D. Borisevich, V.G. Ignatenko, G.A. Sulaberidze et al. // Journal of radioanalytical and nuclear chemistry. – 1996. – Vol. 205, № 2. – pp. 181–184.
26. Zeng S.A Method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades / S. Zeng, C. Ying // Separation science and technology. – 2000. – Vol. 35, № 14. – P. 2173-2186.
27. Borisevich V.D. New approach to optimize Q-cascades / V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze, S. Zeng // Chemical Engineering Science. – 2011. – Vol. 66. – pp. 393-396.

28. Получение высокочистых SF₆ и AsH₃ на газовых центрифугах / С. И. Белянцев, С. М. Зырянов, А. А. Зайков [и др.] //Химия. – 2012. – Т. 48, № 8. – С. 873-877.

29. Maximizing separation performance of Q-cascades for multicomponent isotope separation / S. Zeng, Y. Zhang, D. Jiang et al. // Separation science and technology. – 2018. – Vol. 53, № 1. – pp. 97-109.

30. Кнунянц И.Л. Химическая энциклопедия. В 3 частях. Часть 3 / И.Л. Кнунянц. – Москва: Советская энциклопедия, 1992. – 639 с. – ISBN 5-82270-039-8.

31. Zeng S.A Method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades / S. Zeng, C. Ying // Separation science and technology. – 2000. – Vol. 35, № 14. – pp. 2173-2186.

32. Centrifugal enrichment of cadmium isotopes as the basis for further experiments on physics of weak interactions / Artyukhov A.A., Babichev A.P., Knyasev I.Yu. et al. // Nucl. Instr. Meth. – 1997. – A401. – pp. 281-288

33. Лидин Р.А. Химические свойства неорганических веществ: Учебное пособие. / Р.А. Лидин. – Москва: Химия, 2000. – 480 с. – ISBN 5-7245-1163-0

34. Borisevich V.D. New approach to optimize Q-cascades / V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze, S. Zeng // Chemical Engineering Science. – 2011. – Vol. 66. – pp. 393-396.

35. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 28.03.2021) // Собрание законодательства РФ. - 07.01.2002.

36. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ».

37. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

38. ГОСТ 12.1.007-76 «ССБТ. Вредные вещества».

39. ГОСТ 12.1.038-82 «ССБТ. Электробезопасность».
40. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона».
41. ГОСТ 12.1.004-91 «ССБТ. Пожарная безопасность».
42. СанПин 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».
43. МУ 2.6.5.033-2017 Организация вентиляции на радиационно опасных предприятиях (производствах) госкорпорации "Росатом"
44. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».