

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Расчет Q-каскада по получению высокообогащенного кремния-28</b>

УДК 621.039.73:546.28.027

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ11	Петров Максим Вениаминович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Орлов А.А.	Д.Т.Н., профессор		

Консультант (руководство ВКР на английском языке)

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

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Л.Ю.	К.Э.Н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Передерин Ю.В.	К.Т.Н., доцент		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Видяев Д.Г.	Д.Т.Н., профессор		

Томск – 2023 г.



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

School of Nuclear Science & Engineering

Field of training: 14.04.02 Nuclear Science and Technology

Specialization: Isotope technologies and materials

Nuclear Fuel Cycle Division

**MASTER THESIS**

Topic of research work

**Calculation of the Q-cascade for the production of highly enriched silicon-28**

UDC 621.039.73:546.28.027

Student

Group	Full name	Signature	Date
0AM11	Petrov Maxim Veniaminovich		

Scientific supervisor

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor NFCD SNSE TPU	Orlov A.A.	Ph.D., professor		

Advisers

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor NFCD SNSE TPU	Timchenko S.N.	Ph.D., associate professor		

**ADVISERS:**

Section «Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving»

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor DSSH SBET TPU	Spitsyna L.Yu.	Ph.D., associate professor		

Section «Social Responsibility»

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Associate Professor NFCD SNSE TPU	Perederin Yu.V.	Ph.D., associate professor		

**ADMITTED TO DEFENSE:**

Program Director	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Isotope technologies and materials	Vidyaev D.G.	Ph.D., professor		

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
<b>Универсальные</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные</b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ
<b>Профессиональные</b>	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения
ПК(У)-2	Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии
ПК(У)-3	Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов
ПК(У)-4	Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах
ПК(У)-5	Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета
ПК(У)-6	Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-7	Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов
ПК(У)-8	Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-9	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-10	Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии

## LEARNING OUTCOMES

Competence code	Competence name
<b>Universal competences</b>	
<b>UC(U)-1</b>	Ability to make critical analysis of problem-based situations using the systems analysis approach, and generate decisions and action plans.
<b>UC(U)-2</b>	Ability to run a project at all life-cycle stages.
<b>UC(U)-3</b>	Ability to organize and lead the teamwork and generate a team strategy to achieve the target goal.
<b>UC(U)-4</b>	Ability to use modern communication technologies to realize academic and professional interaction.
<b>UC(U)-5</b>	Ability to analyze and account for cultural diversity in the process of intercultural interaction.
<b>UC(U)-6</b>	Ability to set and pursue individual and professional activity priorities and ways to modify professional activity based on the self-esteem.
<b>General professional competences</b>	
<b>GPC(U)-1</b>	Ability to formulate goals and objectives of the research study, select assessment criteria, identify priorities for solving problems.
<b>GPC(U)-2</b>	Ability to apply modern research methods, evaluate and present the results of the performed research.
<b>GPC(U)-3</b>	Ability to present research outcomes in the form of articles, reports, scientific reports and presentations using computer layout systems and office software packages.
<b>Professional competences</b>	
<b>PC(U)-1</b>	Ability to use fundamental laws in a volume sufficient for independent combination and synthesis of new ideas, creative self-expression
<b>PC(U)-2</b>	Ability to create new methods for calculating modern physical installations and devices, develop methods and advanced technologies
<b>PC(U)-3</b>	Ability to create mathematical and physical models that describe processes and phenomena in separation cascades, installations for the separation and fine purification of substances, processing and neutralization of industrial waste
<b>PC(U)-4</b>	Ability to assess the prospects for the development of the nuclear industry, use its modern achievements and advanced technologies in research work
<b>PC(U)-5</b>	Ability to independently perform experimental and theoretical research to solve scientific and industrial problems using modern instruments for scientific research and mathematical calculation methods
<b>PC(U)-6</b>	Ability to carry out calculation, conceptual and design development of modern physical installations and devices
<b>PC(U)-7</b>	Ability to formulate terms of reference, use information technologies and application packages in the design and calculation of physical installations, use knowledge of methods for analyzing environmental and economic efficiency in the design and implementation of projects
<b>PC(U)-8</b>	Ability to objectively analyze technical and computational-theoretical developments, solutions and projects, taking into account their compliance with the requirements of laws in the field of industry, ecology, technical, radiation and nuclear safety, other regulations at the Russian and international level, prepare an expert opinion
<b>PC(U)-9</b>	Readiness for teaching activities in the main educational programs of higher education and additional professional education (APE)
<b>PC(U)-10</b>	Ability to develop plans and programs for the organization of innovative activities, carry out a feasibility study of innovative projects, manage programs for the development of new products and technologies



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ Видяев Д.Г.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0AM11	Петрову Максиму Вениаминовичу

Тема работы:

Расчет Q-каскада по получению высокообогащенного кремния-28	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 27-77/С от 27.01.2023

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Задание. Литературные источники по методике расчета Q-каскадов, физико-химическим свойствам изотопов кремния и тетрафторида кремния, применению изотопов кремния, особенностям процесса разделения многокомпонентных изотопных смесей.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор и анализ литературы</li> <li>2. Описание алгоритма расчета параметров Q-каскада</li> <li>3. Результаты расчетов, их анализ</li> <li>4. Экономический расчет</li> <li>5. Охрана труда и техника безопасности</li> <li>6. Выводы. Заключение</li> </ol>

<b>Перечень графического материала</b>	Графики: 1. Схема ковалентных связей в кристаллическом кремнии 2. Модель многоэтапного процесса разделения 3. Модель разделения в четырех-поточном каскаде 4. Алгоритм работы программы 5. Профиль каскада 1-ого этапа разделения 6. Распределение концентраций компонентов смеси по ступеням каскада 1-ого этапа разделения 7. Профиль каскада 2-ого этапа разделения 8. Распределение концентраций компонентов смеси по ступеням каскада 2-ого этапа разделения
--	---

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент Отделения социально-гуманитарных наук, к.э.н. Спицына Л.Ю.
Социальная ответственность	Доцент Отделения ядерно-топливного цикла, к.т.н. Передерин Ю.В.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	27.01.2023
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM11	Петров М.В.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

School of Nuclear Science & Engineering  
Field of training: 14.04.02 Nuclear Science and Technology  
Specialization: Isotope technologies and materials  
Nuclear Fuel Cycle Division

APPROVED BY:  
 Program Director  
 \_\_\_\_\_ Vidyayev D.G  
 « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023

### ASSIGNMENT for the Graduation Thesis completion

In the form:

master's thesis
-----------------

For a student:

Group	Full name
0AM11	Petrov Maxim Veniaminovich

Topic of research work:

Calculation of the Q-cascade for the production of highly enriched silicon-28
---

Approved by the order of the Director of School of Nuclear Science & Engineering (date, number):	№ 27-77/C dated January 27, 2023
--	----------------------------------

Deadline for completion of Master Thesis:	
---	--

#### TECHNICAL TASK:

<p><b>Initial date for research work:</b>  <i>(the name of the object of research or design; performance or load; mode of operation (continuous, periodic, cyclic, etc.); type of raw material or material of the product; requirements for the product, product or process; special requirements to the features of the operation of the object or product in terms of operational safety, environmental impact, energy costs; economic analysis, etc.)</i></p>	<p>Task. Literature sources on the method of calculating Q-cascades, the physicochemical properties of silicon isotopes and silicon tetrafluoride, the use of silicon isotopes, the features of the process of separation of multicomponent isotope mixtures.</p>
<p><b>List of the issues to be investigated, designed and developed</b>  <i>(analytical review of literary sources with the purpose to study global scientific and technological achievements in the target field, formulation of the research purpose, design, construction, determination of the procedure for research, design, and construction, discussion of the research work results, formulation of additional sections to be developed; conclusions).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Review and analysis of literature</li> <li>2. Description of the algorithm for calculating the Q-cascade parameters</li> <li>3. Results of calculations, their analysis</li> <li>4. Economic calculation</li> <li>5. Occupational health and safety</li> <li>6. Conclusions</li> </ol>

<p><b>List of graphic material</b> <i>(with an exact indication of mandatory drawings)</i></p>	<p>Figure:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Scheme of covalent bonds in crystalline silicon</li> <li>2. Model of a multi-stage separation process</li> <li>3. Separation model in a four-flow cascade</li> <li>4. The algorithm of the program</li> <li>5. Profile of the cascade of the 1st stage of separation</li> <li>6. Distribution of the concentrations of the mixture components by stages of the cascade of the 1st stage of separation</li> <li>7. Profile of the cascade of the 2nd stage of separation</li> <li>8. Distribution of the concentrations of the mixture components by stages of the cascade of the 2nd stage of separation</li> </ol>
--	--

<p><b>Advisors to the sections of the Master Thesis</b> <i>(with indication of sections)</i></p>	
Section	Advisor
Financial management, resource efficiency and resource saving	Associate Professor of the Department of Social Sciences and Humanities, Ph.D. Spitsyna L. Yu.
Social Responsibility	Associate Professor of the Department of Nuclear Fuel Cycle, Ph.D. Perederin Yu.V.

<p><b>Date of issuance of the assignment for Master Thesis completion according to the schedule</b></p>	
---	--

**Assignment issued by a scientific supervisor / advisor (if any):**

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor NFCD SNSE TPU	Orlov A.A.	Ph.D., professor		

**Assignment accepted for execution by a student:**

Group	Full name	Signature	Date
0AM11	Petrov Maxim Veniaminovich		



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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.01.2023	Разработка и утверждения технического задания	10
15.03.2023	Подбор и изучение материалов по теме исследования	5
20.03.2023	Изучение возможности расчетной модели	25
10.05.2023	Освоение методики расчета и проведение расчета $Q$ -каскадов	20
16.05.2023	Анализ и обобщение полученных результатов	15
18.05.2023	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность	15
26.05.2023	Оформление пояснительной записки и презентации	10

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

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

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Видяев Дмитрий Геннадьевич	д.т.н., профессор		

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

School of Nuclear Science & Engineering

Field of training: 14.04.02 Nuclear Science and Technology

Specialization: Isotope technologies and materials

Nuclear Fuel Cycle Division

Work submission form:

Master thesis
---------------

**CALENDAR RATING PLAN  
 completion of the final qualifying work**

Deadline for student submission of completed work:	
--	--

Date control	Section (module) name / type of work (research)	Maximum section (module) score
27.01.2023	Development and approval of terms of reference	10
15.03.2023	Selection and study of materials on the research topic	5
20.03.2023	Studying the possibility of a calculation model	25
10.05.2023	Mastering the calculation methodology and performing the calculation of $Q$ -cascades	20
16.05.2023	Analysis and generalization of the obtained results	15
18.05.2023	Financial management, resource efficiency and resource saving; Social responsibility	15
26.05.2023	Preparation of an explanatory note and presentation	10

**COMPILED BY:  
 Scientific supervisor**

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor NFCD SNSE TPU	Orlov Alexey Alekseevich	Ph.D., professor		

**AGREED:  
 Program Director**

Position	Full name	Academic degree, academic rank	Signature	Date
Professor NFCD SNSE TPU	Vidyaev Dmitry Gennadievich	Ph.D., professor		

## ABSTRACT

Master's thesis contains: 100 pages, 38 tables, 11 figures, 77 references.

Keywords: silicon tetrafluoride,  $Q$ -cascade, mass transfer, mathematical model, non-stationary process.

The object of study is the  $Q$ -cascade for obtaining silicon tetrafluoride highly enriched in  $^{28}\text{Si}$ .

The purpose of this work is to calculate the parameters of the  $Q$ -cascade to obtain highly enriched  $^{28}\text{Si}$ .

In the course of the study, the following were carried out: calculations of the 1st and 2nd stage of separation, as a result of which the profiles of the corresponding  $Q$ -cascades and the dependences of the distribution of the concentration of silicon isotopes over their stages were obtained. It is shown that silicon isotopes are distributed over the stages of the cascade in accordance with their mass numbers.

The calculation of the parameters of the  $Q$ -cascade to obtain highly enriched  $^{28}\text{Si}$  showed that one stage of separation can produce  $^{28}\text{Si}$  with a concentration of 99.92% with a product flow of 32.31 g/s. The number of stages of the cascade was 135.

It is recommended to use the heavy fraction waste flow of the first separation stage for further enrichment of  $^{29}\text{Si}$  and  $^{30}\text{Si}$ , since the concentration of  $^{28}\text{Si}$  in this flow after the first separation stage is low (0.1%) and the mixture can be considered two-component.

In the second separation stage, using a multi-stage separation process in the light fraction waste flow, it is possible to achieve a  $^{29}\text{Si}$  concentration of 99.74% with a flow of 1.61 g/s. In the heavy fraction waste flow of the cascade, the  $^{30}\text{Si}$  concentration is 99.91% at a flow value of 1.08 g/s. At the same time, the number of stages of the cascade of the second separation stage was 139.

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

## Table of contents

Introduction .....	15
1 Theoretical part .....	17
1.1 Properties of silicon, its isotopes and their applications .....	17
1.1.1 Physical properties .....	17
1.1.2 Chemical properties .....	18
1.1.3 Application of silicon and its isotopes .....	20
1.2 Used substance .....	21
1.2.1 Physical properties of SiF <sub>4</sub> .....	22
1.2.2 Chemical properties of SiF <sub>4</sub> .....	23
1.3 Features of separation of multicomponent isotopic mixtures.....	25
1.4 Quasi-ideal and model cascades .....	28
1.4.1 <i>Q</i> -cascade .....	30
1.4.2 <i>R</i> -cascade .....	31
2 Algorithm and program implementation for calculating the <i>Q</i> -cascade parameters .....	32
2.1 Algorithm for calculating the parameters of the <i>Q</i> -cascade .....	32
2.2 Program implementation of the algorithm for calculating the parameters of the <i>Q</i> -cascade .....	35
3 Calculation of <i>Q</i> -cascade parameters.....	38
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .	46
4.1 Предпроектный анализ.....	47
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	47
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективность и ресурсосбережения.....	48

4.1.3 SWOT-анализ .....	50
4.2 Инициализация проекта .....	53
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом .....	55
4.3.1 Иерархическая структура работ проекта.....	55
4.3.2 Контрольные события проекта.....	55
4.3.3 План проекта .....	56
4.4 Бюджет научного исследования.....	59
4.4.1 Расчет материальных затрат .....	59
4.4.2 Расчет амортизации оборудования .....	60
4.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы .....	61
4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды.....	63
4.4.5 Накладные расходы .....	64
4.4.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	65
4.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования ..	65
4.6 Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» .....	68
5 Социальная ответственность .....	70
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	70
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства .....	70
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	71
5.2 Производственная безопасность .....	74
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов.....	74

5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов .....	75
5.2.3 Отклонение показателей микроклимата.....	75
5.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения.....	77
5.2.5 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	78
5.2.6 Превышение уровня шума .....	82
5.2.7 Психофизиологические факторы .....	82
5.2.8 Поражение электрическим током .....	83
5.2.9 Пожарная и взрывная безопасность.....	85
5.3 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях.....	87
5.4 Вывод по разделу «Социальная ответственность».....	88
Conclusions .....	90
References .....	91

## Introduction

Isotopes are called atoms of the same chemical element, differing in mass number. In order to fully use the properties of a certain isotope, it is necessary to enrich the natural isotope mixture with respect to it to a high concentration close to 100%. The main industrial method for the separation and enrichment of isotopic mixtures is the gas centrifuge method, which was originally developed for the separation of uranium isotopes. Later, this method was used to separate stable and radioactive isotopes of various chemical elements. To carry out the separation, the isotope 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. Multiplication of the separation effect is achieved by connecting stages in series in a cascade [1]. 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.

Currently, isotope products are used in biology, medicine, nuclear power engineering, and electronics. Silicon is the main element in the production of semiconductor electronics. To improve the characteristics of manufactured microcircuits based on silicon, it is enriched with  $^{28}\text{Si}$ . In a particular case, such enrichment leads to an increase in the thermal conductivity of a silicon single crystal [2]. In this regard, the development of a technology for obtaining highly enriched  $^{28}\text{Si}$  is topical.

The relevance of this 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 isotopic mixtures does not allow calculating the parameters of a real cascade. Launching a cascade for separating multicomponent mixtures requires an enormous amount of time and resources.

Carrying out the calculation of a model cascade is one of the stages of designing a real cascade. Suitable model cascades for estimating the parameters of a real cascade are special cases of a quasi-ideal cascade, such as *Q*-cascade and *R*-cascade [3]. The paper presents the calculation of the parameters of the *Q*-cascade to obtain  $^{28}\text{Si}$  enriched to a concentration of 99.9%. If necessary,  $^{28}\text{Si}$  can be enriched to a concentration of at least 99.999% according to the patent [4].



## 1 Theoretical part

### 1.1 Properties of silicon, its isotopes and their applications

#### 1.1.1 Physical properties

The free silicon atom in the ground state has the electronic configuration  $[\text{Ne}]3s^23p^2$ . Silicon crystallizes in the diamond structure with  $a_0 = 0.357$  nm at  $25^\circ\text{C}$ , which corresponds to a Si–Si distance of 0.235 nm and a covalent atomic radius of 0.117 nm.

The exact value of the density and lattice parameters of pure single-crystal silicon make it possible to calculate the value of the Avogadro constant ( $N_A = 6.0221363 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ), which practically coincides with the generally accepted value ( $N_A = 6.0221367 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ) [5, 6].

At normal pressure silicon does not form allotropic forms. At high pressures, the 4-coordination diamond-like Si–I structure transforms into other modifications. Among them are Si–II with a distorted diamond structure, Si–V with a primitive hexagonal structure, and Si–VII with a hexagonal close packing. During these transitions, the coordination number consistently increases [5, 7].

Silicon is much more volatile than carbon and has a lower evaporation energy, which indicates a lower Si–Si bond energy. Silicon in the form of a simple substance is a semiconductor with a noticeable gray-blue metallic luster. Resistivity decreases with increasing temperature, as is the case with semiconductors. Resistivity significantly depends on sample purity and is about 40  $\text{Ohm} \cdot \text{cm}$  at  $25^\circ\text{C}$  for high purity silicon.

Natural silicon contains  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ , and  $^{30}\text{Si}$ . There are no other stable isotopes. In addition to the above isotopes, there are synthesized radioactive isotopes of silicon:  $^{22}\text{Si}$ ,  $^{23}\text{Si}$ ,  $^{24}\text{Si}$ ,  $^{25}\text{Si}$ ,  $^{26}\text{Si}$ ,  $^{27}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{Si}$ ,  $^{33}\text{Si}$ ,  $^{34}\text{Si}$ ,  $^{34m}\text{Si}$ ,  $^{35}\text{Si}$ ,  $^{36}\text{Si}$ ,  $^{37}\text{Si}$ ,  $^{38}\text{Si}$ ,  $^{39}\text{Si}$ ,  $^{40}\text{Si}$ ,  $^{41}\text{Si}$ ,  $^{42}\text{Si}$ ,  $^{43}\text{Si}$ ,  $^{44}\text{Si}$ . At the same time,  $^{31}\text{Si}$  formed under the action of neutrons on  $^{30}\text{Si}$  by the reaction  $\text{Si}^{30}(\text{n}, \gamma)\text{Si}^{31}$  has a half-life of 2.62 h. It can be determined by the characteristic  $\beta$ -radiation ( $E_{\text{max}} = 1.48 \text{ MeV}$ ).  $\beta$ -radiation of  $^{31}\text{Si}$  is used for the quantitative determination of silicon by neutron activation analysis. The  $^{32}\text{Si}$  radionuclide has the longest half-life ( $\sim 172$  years) and is soft

(low energy). The half-life of the remaining radioactive isotopes of silicon is less than 7 s. The  $^{29}\text{Si}$  nucleus has a nuclear spin  $I = 1/2$  and is increasingly used in NMR spectroscopy [5, 8].  $^{28}\text{Si}$  and  $^{30}\text{Si}$  have zero spin. Table 1.1 lists the main properties of stable silicon isotopes.

Table 1.1 – Properties of stable silicon isotopes [9]

Nuclide	$J^\pi$	$M$ , Da	$\Delta$ , keV	$\mu$ , nm	$Ab$ , %	$\sigma_{\eta\gamma}$ , mb
$^{28}\text{Si}$	$0^+$	27.98	-21492.8		92.23	177
$^{29}\text{Si}$	$1/2^+$	28.98	21895.05	-0,55	4.68	119
$^{30}\text{Si}$	$0^+$	29.97	-24432.93		3.09	107

### 1.1.2 Chemical properties

Silicon is a chemical element of the 14th group, the third period of the periodic system of chemical elements of D. I. Mendeleev, with atomic number 14.

Silicon atoms are characterized by the state of  $sp^3$  hybridization of orbitals. Pure crystalline silicon forms a diamond-like cubic crystal lattice with a coordination number of 4, in which silicon is tetravalent and is bonded to neighboring silicon atoms by covalent bonds. In compounds, silicon manifests itself as a tetravalent element with oxidation states of +4 or -4.

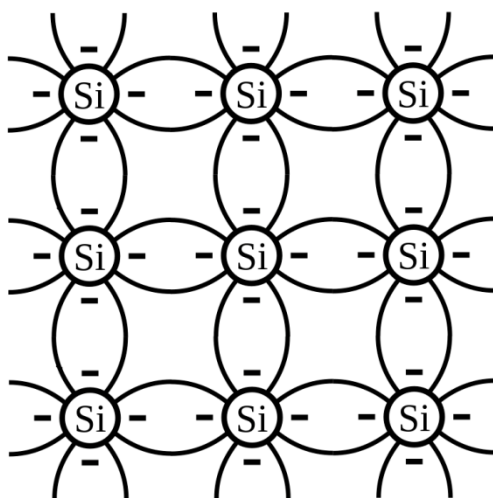


Figure 1.1 – Scheme of covalent bonds in crystalline silicon

Silicon is stable in air. Forms a protective oxide film. In crystalline form, it is slightly reactive. Does not react with water, acids, hydrogen [10].

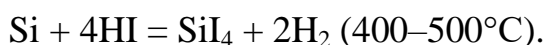
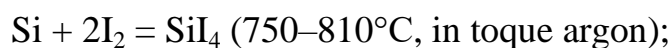
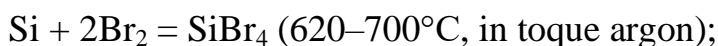
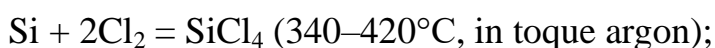
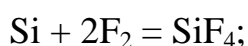
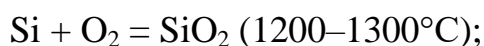
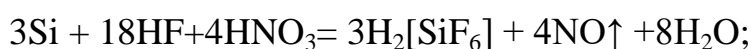
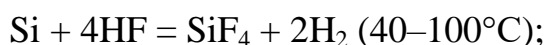
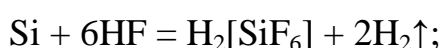
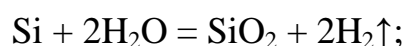
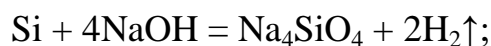
In the amorphous form, it is more active. Reacts with concentrated hydrofluoric acid, alkalis. Oxidized by oxygen, halogens, reacts with hydrogen halides, ammonia, hydrogen sulfide, metal sulfides when heated [5, 10].

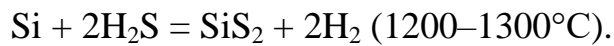
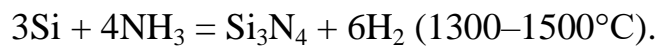
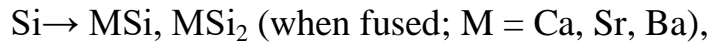
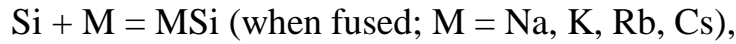
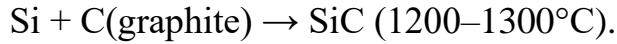
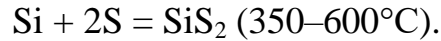
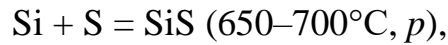
Extremely active in the molten state. Reacts with alkali, alkaline earth and other metals [5, 10]. Alloys, but does not react, with beryllium, aluminum, gallium, indium, tin, antimony, zinc, silver, gold.

Silicon does not form binary compounds with germanium, tin, lead. In the overwhelming majority of compounds, silicon has a tetrahedral structure, but sometimes a coordination number of 6 and other rarer variants are encountered [5].

Industrial grade silicon is obtained by reducing the  $\text{SiO}_2$  melt with coke at a temperature of about  $1800^\circ\text{C}$  in shaft-type ore-thermal furnaces. The purity of silicon obtained in this way can reach 99.9% (the main impurities are carbon and metals).

Chemical reactions of silicon with various substances [5, 10]:





### 1.1.3 Application of silicon and its isotopes

Silicon is used in the manufacture of semiconductor devices, solar cells, the production of alloys and the recovery of metals from oxides.

$^{28}\text{Si}$  is used in the doping of semiconductor materials with aluminum, in the manufacture of monochromators [11, 12].

The  $^{28}\text{Si}$  single crystal has a higher thermal conductivity than that of natural silicon. This causes the use of a  $^{28}\text{Si}$  single crystal to improve the thermal conductivity of semiconductors [11–13]. It is believed that semiconductor chips based on a  $^{28}\text{Si}$  single crystal provide faster heat dissipation [2, 15–17]. Due to this, the use of only  $^{28}\text{Si}$  in the production of microcircuits contributes to an increase in the packing density of transistors in a microcircuit and the clock frequency of the microcircuit. In [2, 14, 18], the results of measurements of the thermal conductivity of enriched  $^{28}\text{Si}$  are presented. The maximum value of thermal conductivity enriched in  $^{28}\text{Si}$  up to 99.7%, 99.8588% and 99.995% is respectively  $4 \cdot 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $3 \cdot 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $4.5 \cdot 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Since  $^{28}\text{Si}$  has zero spin, the idea of a quantum computer using the magnetic properties of alloying phosphorus is proposed as a potential application of  $^{28}\text{Si}$

single crystals [11, 12, 19]. For semiconductor quantum computing, the concentration of  $^{28}\text{Si}$  must be at least 99.999% [20, 21].

Enriched  $^{28}\text{Si}$  was used to create a new mass standard and refine the Avogadro number within the Kilogram project [22, 23]. The required level of relative uncertainty is achieved only when using highly pure highly enriched  $^{28}\text{Si}$  with a concentration of at least 99.999% at a relative concentration of  $^{28}\text{Si}$  to  $^{30}\text{Si}$  of at least 5 and an impurity concentration of carbon and oxygen less than  $1 \cdot 10^{-15}$  atoms/cm<sup>3</sup>, boron and phosphorus - less than  $1 \cdot 10^{-13}$  atoms/cm<sup>3</sup>.

$^{29}\text{Si}$  is used in the study of intrinsic and impurity defects, in the distribution of impurities in semiconductor materials, in the detection of local centers and irregularities in the structure of glasses, crystals, and ceramics by the electron paramagnetic resonance (EPR) method [11, 12].

$^{29}\text{Si}$  is used in nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR spectroscopy) [11–13, 24–26] and is used for instrument calibration in order to expand the range of resonant frequencies detected by NMR spectroscopy [11–13].

Silicon-based quantum computing uses  $^{29}\text{Si}$  nuclear spins as qubits, with  $^{28}\text{Si}$  used as the substrate. The dipole coupling between adjacent  $^{29}\text{Si}$  nuclear spins is used for two-qubit operations, and the selectivity of the qubits is provided by a large magnetic field gradient induced by a small magnet located next to the array. The reading of each qubit is achieved by moving the state to the end of the chain using a sequence of exchange operations between neighboring qubits. The spin state of the  $^{29}\text{Si}$  nucleus at the end of the chain is read from an electron in the phosphorus atom located next to the  $^{29}\text{Si}$  atom [27, 28].

$^{30}\text{Si}$  is used in the production of the  $^{31}\text{Si}$  radioisotope by reaction  $\text{Si}^{30}(\text{n}, \gamma)\text{Si}^{31}$ , in the study of silicon self-diffusion [11–13], and in the neutron doping of semiconductor materials with phosphorus [11, 12, 29–32].

## 1.2 Used substance

A method is known for producing highly enriched  $^{28}\text{Si}$  using silicon tetrafluoride ( $\text{SiF}_4$ ) as a used substance [33]. The advantage of using this substance

is that fluorine has only one stable isotope and its presence does not interfere with the separation of isotopes of the main element. The use of fluorides for isotope separation is a common practice in centrifugation.

### 1.2.1 Physical properties of SiF<sub>4</sub>

Silicon tetrafluoride (SiF<sub>4</sub>) is a binary inorganic compound of silicon and fluorine. SiF<sub>4</sub> is a colorless poisonous gas with a pungent odor, thermally stable [10, 34, 35].

The molar mass of SiF<sub>4</sub> is 104.08 g/mol. [10, 34, 35]. The critical temperature of SiF<sub>4</sub> is minus 14.2°C and the critical pressure is 3.72 MPa. The melting point of SiF<sub>4</sub> is minus 86.8°C at 0.224 MPa. The boiling point of SiF<sub>4</sub> is minus 65°C at 0.241 MPa. The sublimation temperature of SiF<sub>4</sub> is minus 95.7°C at 0.1 MPa [34, 35].

The sublimation pressure of purified SiF<sub>4</sub> by multiple fractionation is expressed by the equation [34]:

$$\lg P = -6100/4.57 \cdot T + 10,382 \quad (1.1)$$

where  $P$  is pressure, mm Hg.;  $T$  is temperature, K.

Tables 1.2 and 1.3 show the density of gaseous and solid SiF<sub>4</sub>.

Table 1.2 – Density of gaseous SiF<sub>4</sub> at a pressure of 0.1 MPa [34]

$t, ^\circ\text{C}$	-95	-87	-85.7	-84	-82.1	-80.1	-78.7	-78.4	0
$d, \text{g/l}$	1660	1630	1622	1614	1604	1598	1592	1590	4.68

The density of SiF<sub>4</sub> at 15°C and 0,1 MPa is 4.43 g/l.

Table 1.3 – Density of solid SiF<sub>4</sub> at a pressure of 0.1 MPa [34]

$t, ^\circ\text{C}$	-273	-195	-192	-183	-170
$d, \text{g/l}$	2200	2145	1960	2133	2170

SiF<sub>4</sub> has a tetrad molecule. In this case, the Si–F interatomic distance is 1.55 Å [34, 35]. The force constant of the Si–F bond is 87000 dyn/cm [35].

The main vibration frequencies of the SiF<sub>4</sub> molecule are given in Table 1.4.

Table 1.4 – Vibration frequencies of the SiF<sub>4</sub> molecule [34]

$\omega, \text{cm}^{-1}$	800	285	1000	431
--------------------------	-----	-----	------	-----

The molar heat capacity and enthalpy of SiF<sub>4</sub> are given in tables 1.5 and 1.6.

Table 1.5 – Molar heat capacity of SiF<sub>4</sub> [34]

$T, \text{K}$	$C_p, \text{cal/mol K}$	$T, \text{K}$	$C_p, \text{cal/mol K}$
298,1	17.47	500	21.39
300	17.52	550	21.98
350	18.77	600	22.47
400	19.81	650	22.88
450	20.68	700	23.22

The heat of formation of SiF<sub>4</sub> is 370.8 kcal/mol.

Table 1.6 – Enthalpy of SiF<sub>4</sub> [34]

Enthalpy of fusion $\Delta H_{fn}$ , (kJ/mol)	Boiling enthalpy $\Delta H_{kun}$ , (kJ/mol)	Enthalpy of sublimation $\Delta H_{6032}$ , (kJ/mol)
9.38	15.36	5.91

### 1.2.2 Chemical properties of SiF<sub>4</sub>

SiF<sub>4</sub> is considered to be highly toxic, as hydrogen fluoride (HF) is released upon contact with hot water and acids. HF poses a great danger to humans. The substance has a narcotic effect and adversely affects the work of the cardiovascular, excretory, respiratory systems. It affects the skin and mucous membranes. Poisoning with a mixture through the skin proceeds painlessly. Symptoms appear the next day: the formation of ulcers on the skin and burns on the mucous membrane of the eyes. Ingestion causes destruction of lung tissue.

SiF<sub>4</sub> is poorly soluble in benzene and trichlorethylene. The solubility of SiF<sub>4</sub> is given in Table 1.7.

Table 1.7 – Solubility of SiF<sub>4</sub> at 27–33 °C [34]

Solvent	Solubility, %
Acetic acid	1.1
Acetone	3.1
Glycerin	5.7
Fusel oil	17.3
Butyl alcohol	23.4
Glycol	26.2
Isopropyl alcohol	28.2
Methyl alcohol	32.8
Ethanol	37.8

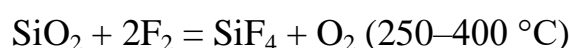
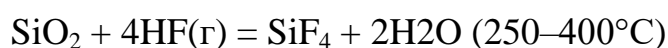
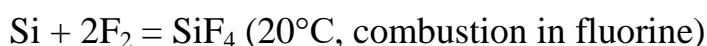
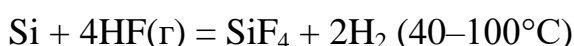
SiF<sub>4</sub> does not form silicic acid esters when reacted with ethyl alcohol. Silicon fluoride is slightly soluble in dry vaseline oil, which can be used as a barrier fluid.

SiF<sub>4</sub> cannot be reduced by hydrogen, hydrogen sulfide, sulfur, carbon and phosphorus. The reduction process of SiF<sub>4</sub> with low reactive metals is highly endothermic and cannot proceed. The reduction of SiF<sub>4</sub> with aluminum, alkaline earth and alkali metals is thermodynamically possible [34].

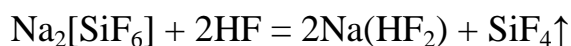
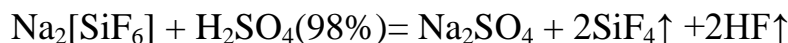
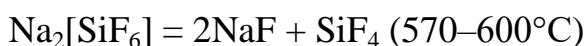
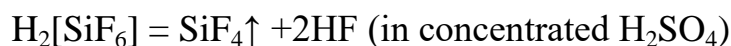
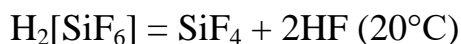
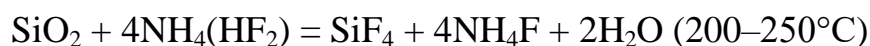
Glass is resistant to dry SiF<sub>4</sub> at room temperature. Jena glass reacts with SiF<sub>4</sub> at 220°C. Glass wool reacts with silicon fluoride at 450°C [34].

SiF<sub>4</sub> does not react with concentrated sulfuric acid, mercury at room temperature. Easily hydrolyzed by water. Reacts with water vapor at temperatures above 800°C. Forms fluorine complexes [10, 36].

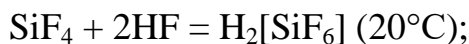
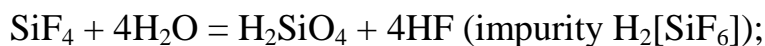
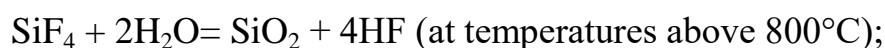
SiF<sub>4</sub> synthesis reaction [10, 34, 35]:







Chemical reactions with  $\text{SiF}_4$  [32, 35, 36]:



The chemical reactions of  $\text{SiF}_4$  are used in chemical processing in the synthesis of a commercial product or in the isolation of silicon for further crystallization.

### 1.3 Features of separation of multicomponent isotopic mixtures

Enrichment of an isotopic mixture in terms of the target isotope by gas centrifuge technology is accompanied by non-stationary hydraulic processes. Such processes affect the pressure value in the routes, on the flows of the working mixture inside the stages of the cascade, extraction and waste, on the content of isotopes in the working mixture, in the stages and flows of the cascade. Due to the fact that the gas pressure in the rotor of a gas centrifuge is much less than atmospheric pressure, non-stationary processes have a significant effect on the distribution of isotopes in the cascade. In [37], the results of studying the effect of nonstationary processes on the distribution of isotopes in a multicomponent

isotopic mixture over the cascade stages in the process of filling the cascade with the working mixture are presented.

The process of separating a multicomponent isotopic mixture can be divided into two stages: the nonstationary process of filling the cascade with the working mixture and the stationary mode of separation. The nonstationary process is due to two main processes: the establishment of preset pressures in the cascade paths and the distribution of the mixture components over the stages according to their mass numbers [37].

In the process of filling the cascade with the working substance, the pressure and flows of the working mixture in the stages, extraction and dump collectors increase to stationary values. In turn, in the stationary mode, the position of the feed flow and the number of stages of the separation stage affect the process of separation of a multicomponent mixture [3, 37, 38].

During the operation of the cascade, the components of the isotopic mixture are separated by distributing the components of the mixture over the stages of the separation cascade in accordance with their molecular weight.

The concentrations of intermediate isotopes take maximum values in the middle part of the cascade. In this case, the distribution of the components of the mixture will take place in the order of increasing mass numbers from the last stage towards the first stage of the cascade.

Methods for studying non-stationary processes for binary mixtures are not suitable for modeling non-stationary processes in multicomponent isotopic mixtures. Applying research methods for binary mixtures, one has to solve large systems of nonlinear algebraic equations, which is a significant drawback. The use of traditional explicit methods, free from this shortcoming, is limited by an unacceptably small value of the time integration stage [37].

At present, methods for the numerical integration of ordinary differential equations are better developed than 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 stage) tends to zero [39].

It is impossible to obtain a product highly enriched in the intermediate isotope within one cascade. To obtain a component highly enriched in the target isotope, there are the following methods:

1. Organization of a multi-stage separation process. In one of the flows of the cascade, the concentration of the extreme component decreases. The resulting multicomponent mixture, depleted in the extreme component, is fed to the next cascade, where the target component is enriched to the required concentration. The use of such separating stages helps to achieve the desired concentration of the target isotope. The number of stages is determined by the number of components in the mixture, the concentrations of the target isotope in the raw material and product, the number of stages, and the profile of the cascade (Figure 1.2) [3, 37–41].

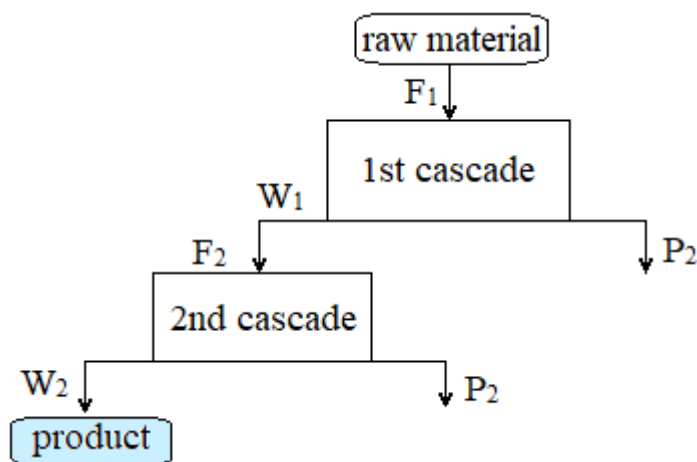


Figure 1.2 – Model of a multi-stage separation process

2. Carrying out the separation process in a 4-flow cascade. Since the concentration of the intermediate component takes on a maximum value in the stages within the cascade, the mixture is waste from the internal stage and fed to the next cascade to increase the concentration of the intermediate component

(Figure 1.3). The feature in the distribution of the feed flow of the stages of the cascade was called «flow expansion» [42].

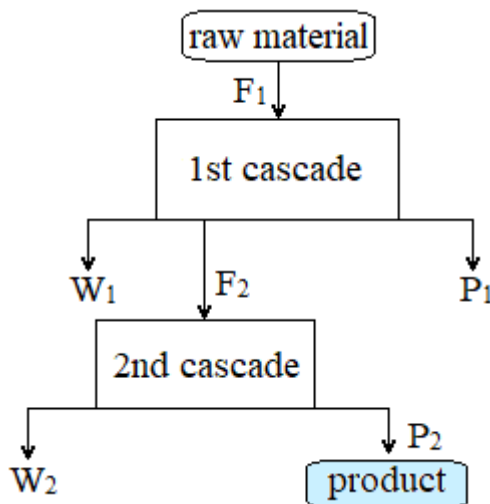


Figure 1.3 – Separation model in a four-flow cascade

#### 1.4 Quasi-ideal and model cascades

Model cascades are used for estimation calculations in the theory of separation cascades for the separation of multicomponent isotopic mixtures. Mathematical models of these cascades are based on the material balance equations [3, 38]:

$$F=P+W \quad (1.2)$$

$$F \cdot C_{Fi}=P \cdot C_{Pi}+W \cdot C_{Wi} \quad (1.3)$$

where  $F$  is the feed flow;  $P$  is the flow enriched in the light component;  $W$  is the flow enriched in the heavy component;  $C_{Fi}$  is the concentration of the target component in the feed stream;  $C_{Wi}$  is the concentration of the target component in the waste stream;  $C_{Pi}$  is the concentration of the target component in the flow.

At the same time, local parameters are determined for each stage, similar to the feed flow and flows enriched in light and heavy components for the cascade: feed flow on stage  $L$ , flow on stage enriched in the light component  $L'$  and flow on

stage enriched in the heavy component  $L''$ . These flows are related by the following relationship [3, 38]:

$$L=L'+L'' \quad (1.4)$$

The flow division factor for a stage is determined as follows [3, 38]:

$$\theta=L'/L \quad (1.5)$$

For each component of the mixture, a partial flow is determined, according to which the amount of the mixture component in the stage is calculated [3, 38]:

$$G_i=Lc_i, \quad G'_i=L'c'_i, \quad G''_i=L''c''_i, \quad (1.6)$$

where  $i$  is the component number;  $G_i$  is the partial feed flow of the stage;  $G'_i$  is the partial product flow of the stage;  $G''_i$  is the partial waste flow of the stage;  $c_i$  is the concentration of the target component in the feed flow;  $c'_i$  is the concentration of the target component in the product flow;  $c''_i$  is the concentration of the target component in the waste flow.

Similar to the flow division factor for a stage, the concept of a partial flow cutoff has been introduced [3, 38]:

$$\varphi_i=G'_i/G_i \quad (1.7)$$

In the absence of corrosion losses of the working substance in a stationary hydraulic mode, the flow rates of the stages and the concentrations of the components of the working substance remain unchanged.

In the case of separation of multicomponent mixtures, several isotopes of the separated chemical element are distributed in the selective and waste parts. Thus, intermediate isotopes are limited by the maximum concentration in the extraction and waste of the separation cascade. The theory and methods for calculating multicomponent isotopic mixtures are given in [43–57]. For an approximate

estimation of the parameters of a real cascade for obtaining the target isotope, the calculation of a model quasi-ideal cascade is used.

A «quasi-ideal» cascade is a cascade in which the relative separation factors and cutoffs of partial flows remain unchanged along the entire length of the cascade [3, 38, 43]. Particular cases of a quasi-ideal cascade are  $Q$ -cascade and  $R$ -cascade [3, 38].

### 1.4.1 $Q$ -cascade

When solving the problem of calculating a cascade for separating multicomponent mixtures, a continuous profile cascade model can be used as a preliminary approximation. The general method for calculating such cascades is described in [44, 45, 57]. It consists in replacing  $C_{is}$ , which are functions of the stage number  $S$ , in the concentration equations with the characteristic functions  $\omega_i(S)$ . These functions are proposed to be set in exponential form:

$$\omega_i(S) = \exp(Q_i S), \quad i = \overline{1, m}, \quad S = \overline{1, n}, \quad (1.8)$$

where  $Q_i$  are constants satisfying the condition:

$$Q_i - Q_k = \varepsilon_{ik}, \quad (1.9)$$

where  $\varepsilon_{ik}$  is the total enrichment factor of the  $i$ -th component with respect to the  $k$ -th one.

In the case of weak enrichments, the total enrichment factor is:

$$\varepsilon_{ik} \approx \ln q_{ik}. \quad (1.10)$$

Model cascades satisfying condition (1.8) are called  $Q$ -cascades. The calculation of  $Q$ -cascades is used in the case of weak enrichment ( $\varepsilon_{ik} \ll 1$ ), since in this case condition (1.10) will be valid.

In [58], an analytical solution is given to determine the cascade parameters for given loss rates and the effect of losses on the total and initial flow at given concentrations.

In [59–61], the main research parameter is parameter  $M$ , which conditionally divides the isotope concentration into heavy and light components depending on the selected target component. A new approach to  $Q$ -cascade optimization is presented. It is used when the target isotope is present in several components of the mixture being separated and it is not possible to accurately determine the target component. In this case, the range of acceptable values for the parameter  $M$  is introduced, and the dimensionless parameter  $Q$  is the relative increase in the concentration of the component.

#### 1.4.2 $R$ -cascade

For a multicomponent mixture, it is impossible to create a cascade in which flows with different concentrations do not mix, due to the difference in  $Q_i$  values.

It is possible to build a cascade with the same relative concentrations of two components with indexes  $i$  and  $k$ , called key ones:

$$R'_{ik}(j-1) = R_{ik}(j) = R''_{ik}(j+1), j = \overline{2, n-1}. \quad (1.11)$$

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

$$\alpha_{ik} = \beta_{ik} = \sqrt{q_{ik}}. \quad (1.12)$$

A cascade satisfying condition (1.11) is called an  $R$ -cascade [3, 38, 46].

The theory of  $R$ -cascades makes it possible to obtain initial approximations for calculating the optimal parameters of a cascade at a given concentration of the target isotope [49]. The  $R$ -cascade is close to optimal for a certain choice of reference components [62–64].

## 2 Algorithm and program implementation for calculating the $Q$ -cascade parameters

The  $Q$ -cascade was chosen as a model for the calculation, since the enrichment factor is 0.2, which is the case of «weak enrichment».

### 2.1 Algorithm for calculating the parameters of the $Q$ -cascade

Algorithm for calculating the  $Q$ -cascade for given values  $c_{iP}$ ,  $c_{iW}$  and  $P$  is as follows [3, 38, 45]:

1. Determination of the weighted average mass number:

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^N M_i C_i, \quad (2.1)$$

where  $M$  is the mass number of the isotope with index  $i$ ,  $C_i$  is the concentration of the isotope with index  $i$ .

2. Determination of light and heavy fraction flows:

$$P = F \left| \frac{C_{Fk} - C_{Wk}}{C_{Pk} - C_{Wk}} \right|, \quad (2.2)$$

where  $P$  is the product flow,  $F$  is the feed flow,  $C_{Fk}$  is the initial isotope concentration,  $C_{Wk}$  is the isotope concentration in the regenerative part of the cascade, and  $C_{Pk}$  is the isotope concentration in the enrichment part of the cascade;

$$W = F - P, \quad (2.3)$$

where  $W$  is the waste flow.

3. Determination of parameters  $Q_i$  and  $M$ :

$$M = \left\{ \begin{array}{l} \frac{M_k + M_{k+1}}{2}, C_{Pk} > C_{Fk} \\ \frac{M_k + M_{k-1}}{2}, C_{Wk} > C_{Fk} \end{array} \right\}, \quad (2.4)$$



where  $M$  is the dimensionless parameter,  $M_k$  is the mass number of the target isotope,  $M_{k+1}$  is the mass number of the isotope following the target isotope,  $M_{k-1}$  is the mass number of the isotope preceding the target isotope.

$$Q_i = \varepsilon_0 (M - M_i), \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.5)$$

where  $Q_i$  is the dimensionless parameter,  $\varepsilon_0$  is the specific enrichment coefficient,  $M_i$  is the mass number of the isotope with index  $i$ .

4. Determination of the maximum concentration of the target isotope in the flow of light and heavy fractions:

$$C_{Pk}^{Max} = \frac{C_{Fk}}{\sum_{i=1}^k C_i}, \quad (2.6)$$

where  $C_{Pk}^{Max}$  is the maximum concentration of the target isotope in the light fraction flow,  $C_i$  is a isotope concentration with index  $i$ .

$$C_{Wk}^{Max} = \frac{C_{Fk}}{\sum_{i=k}^N C_i}, \quad (2.7)$$

where  $C_{Wk}^{Max}$  is the maximum concentration of the target isotope in the heavy fraction flow.

5. Calculation of the number of stages in the regenerative ( $S_W$ ) and enrichment ( $S_P$ ) parts of the cascade:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{Pk} = \frac{1 - e^{Q_k \cdot S_W}}{e^{-Q_k \cdot S_P} - e^{Q_k \cdot S_W}} \cdot C_{Fk} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{e^{-Q_i \cdot S_P} - e^{Q_i \cdot S_W}}{(1 - e^{Q_i \cdot S_W}) \cdot C_{Fi}} \\ C_{Wk} = \frac{e^{-Q_k \cdot S_P} - 1}{e^{-Q_k \cdot S_P} - e^{Q_k \cdot S_W}} \cdot C_{Fk} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{e^{-Q_i \cdot S_P} - e^{Q_i \cdot S_W}}{(e^{Q_i \cdot S_W} - 1) \cdot C_{Fi}} \end{array} \right\}, \quad (2.8)$$

where  $S_P$  is the number of stages in the enrichment part of the cascade,  $S_W$  is the number of stages in the regenerative part of the cascade,  $C_{Fi}$  is the initial concentration of isotope with index  $i$ ,  $Q_k$  is the dimensionless target isotope parameter [3, 38].

6. Calculation of the concentration of components in the selection of the heavy fraction ( $C_{wi}$ ) and in the selection of the light fraction ( $C_{pi}$ ) of the cascade:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{Pi} = \frac{1 - e^{Q_i \cdot S_W}}{e^{-Q_k \cdot S_P} - e^{Q_k \cdot S_W}} \cdot C_{Fi} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{e^{-Q_i \cdot S_P} - e^{Q_i \cdot S_W}}{(1 - e^{Q_i \cdot S_W}) \cdot C_{Fi}} \\ C_{Wi} = \frac{e^{-Q_i \cdot S_P} - 1}{e^{-Q_i \cdot S_P} - e^{Q_i \cdot S_W}} \cdot C_{Fi} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{e^{-Q_i \cdot S_P} - e^{Q_i \cdot S_W}}{(e^{Q_i \cdot S_W} - 1) \cdot C_{Fi}} \end{array} \right. , \quad (2.9)$$

where  $C_{pi}$  is the concentration of isotopes with index  $i$  in the enrichment part of the cascade,  $C_{wi}$  is the concentration of isotopes with index  $i$  in the regenerative part of the cascade.

7. Determination of the total feed flow:

$$L_Q = 2 \sum_{i=1}^N \left( \frac{P \cdot C_{Pi} (e^{-Q_i S_P}) + W \cdot C_{Wi} (e^{Q_i S_P} - 1)}{Q_i^2} + \frac{P \cdot C_{Pi} \cdot S_P - W \cdot C_{Wi} \cdot S_W}{Q_i} \right), \quad (2.10)$$

where  $L_Q$  is the total flow feed.

8. Cascade profile definition:

For the stages of the regenerative part of the  $Q$ -cascade:

$$G(s) = 2W \cdot \frac{C_{wi}}{Q_i} (e^{Q_i s} - 1), \quad 1 \leq s \leq S_F, \quad (2.11)$$

where  $G(s)$  is the cascade profile,  $S_F$  is the number of stages in the regenerative part of the cascade.

For the stages of the enrichment part of the  $Q$ -cascade:

$$G(s) = 2P \cdot \frac{C_{pi}}{Q_i} (1 - e^{-Q_i s}), \quad S_F \leq s \leq n, \quad (2.12)$$

where  $n$  is the total number of stages.

9. Determination of the concentration of components by stages of the cascade:

For the stages of the regenerative part of the  $Q$ -cascade:

$$C_{Wi}(s) = \frac{\frac{C_{Wi}}{Q_i} (e^{Q_i s} - 1)}{\sum_{i=1}^N \frac{C_{Wi}}{Q_i} (e^{Q_i s} - 1)}, \quad 1 \leq s \leq S_F, \quad (2.13)$$

where  $C_{Wi}$  is the concentration of the component with index  $i$  along the stages of the regenerative part of the cascade.

For the stages of the enrichment part of the  $Q$ -cascade:

$$C_{Pi}(s) = \frac{\frac{C_{Pi}}{Q_i} (1 - e^{-Q_i s})}{\sum_{i=1}^N \frac{C_{Pi}}{Q_i} (1 - e^{-Q_i s})}, \quad S_F \leq s \leq n, \quad (2.14)$$

where  $C_{Pi}$  is the concentration of the component with index  $i$  by the stages of the enrichment part of the cascade.

## 2.2 Program implementation of the algorithm for calculating the parameters of the $Q$ -cascade

The tools used were the interpreted programming language «Python» and the interactive development environment for working with notebooks, code and data «Jupyter». This set of software is enough for calculations.

Since the programming language «Python» allows you to implement the program in the form of a notepad and immediately execute it, it was decided to develop two source files: «cascade.py», «calculate.ipynb».

The «cascade.py» file contains the implementation of the «cascade» class, which describes the mathematical model of the  $Q$ -cascade. Each initialized object of this class performs the calculation of the  $Q$ -cascade according to the provided input data. This approach makes it possible to calculate several cascades with a minimum expenditure of time.

Input data of the «cascade» class:

1. Mass array of isotopic mixture components  $M$  [Da];

2. Array of concentrations of isotope mixture components in the feed flow  $C_f$  [%];
3. Required concentrations of the target component in the flow of light  $C_{ip}$  and heavy fraction  $C_{iw}$  [%];
4. Enrichment coefficient  $\varepsilon$ ;
5. Flow division coefficient  $\theta$ ;
6. Feed flow  $F$  [g/s];
7. Ordinal number of the target component  $i$  in the component mass array.

The output of the «cascade» class is:

1. Weighted average mass number  $\overline{M}$  [Da];
2. Array of dimensionless coefficients  $Q_i$ ;
3. Array of concentrations of mixture components in the flow of light  $C_p$  and heavy  $C_p$  fractions [%];
4. The number of stages in the regenerative  $S_w$  and enrichment  $S_p$  parts of the cascade;
5. An array of values of the partial flow of the target component over the stages of the cascade  $G_s$  [g/s];
6. An array of values of the concentrations of the components of the isotope mixture by the stages of the cascade  $C_s$  [%];
7. Flows of light  $P$  and heavy  $W$  fractions [g/s];
8. Total feed flow  $L$  [g/s].

The program operation algorithm is compiled in accordance with the Q-cascade calculation method described in section 2.1 (Figure 2.1).

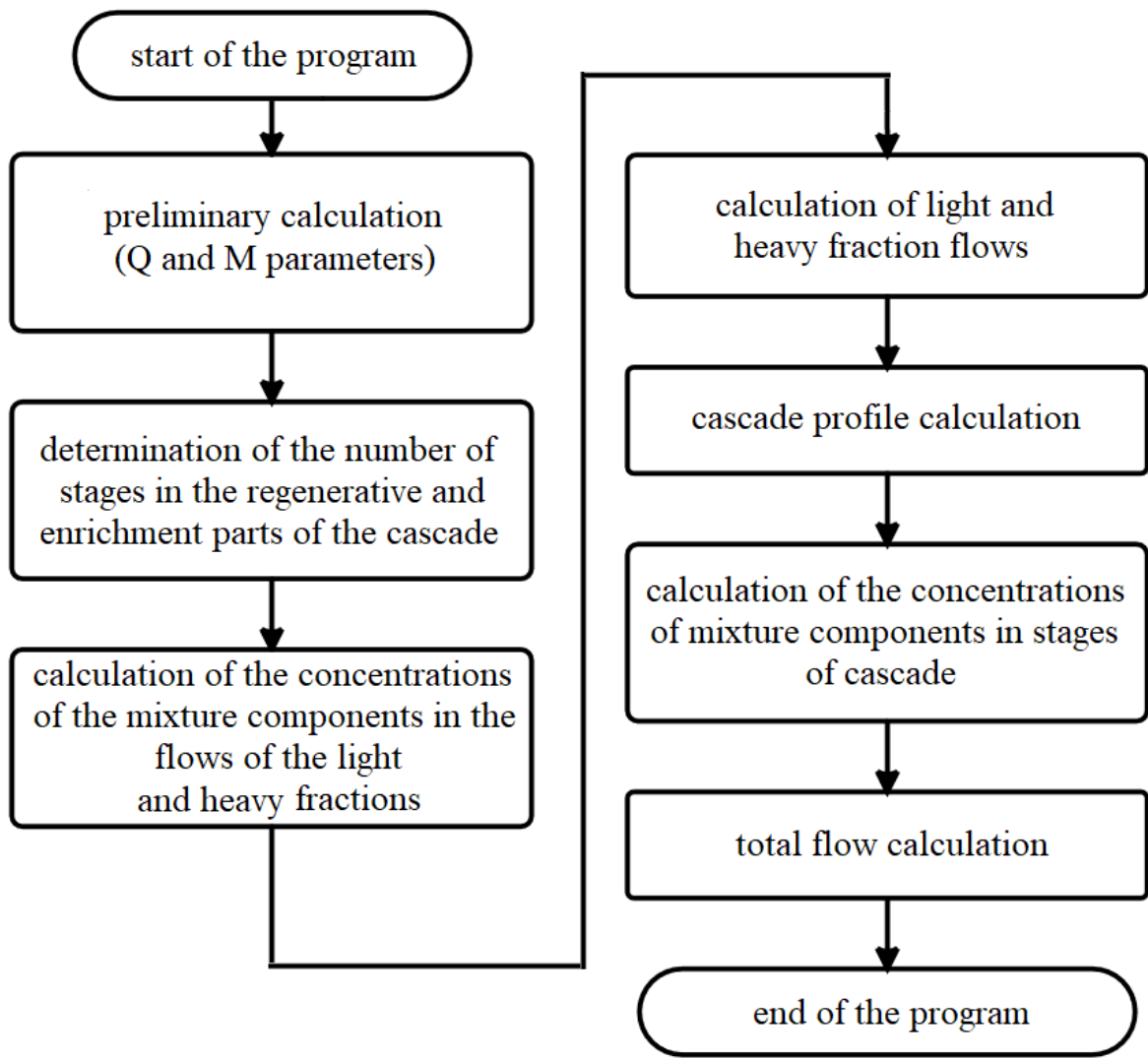


Figure 2.1 – The algorithm of the program

### 3 Calculation of $Q$ -cascade parameters

Using the method described above, the  $Q$ -cascade parameters were calculated to obtain highly enriched  $^{28}\text{Si}$ . The concentration of  $^{28}\text{Si}$  in the light fraction flow is 99.9%, in the heavy fraction flow it is 0.1%. The data for the calculation of the 1st stage of separation are given in Table 3.1.

Table 3.1 – Data for calculating the cascade of the 1st stage of separation

Masses of the components of the mixture	$M(\text{SiF}_4)^{28}\text{Si}$ , Da	104
	$M(\text{SiF}_4)^{29}\text{Si}$ , Da	105
	$M(\text{SiF}_4)^{30}\text{Si}$ , Da	106
Enrichment coefficient, $\varepsilon$		0.2
Flow division coefficient, $\theta$		0.5
Feed flow, $F$ , r/c		35
The concentration of the components of the mixture in the feed flow	$C_f(^{28}\text{Si})$ , %	92.26
	$C_f(^{29}\text{Si})$ , %	4.67
	$C_f(^{30}\text{Si})$ , %	3.07
Required concentrations of the target component in the flows of light and heavy fractions of the cascade	$C_p(^{28}\text{Si})$ , %	99.9
	$C_w(^{28}\text{Si})$ , %	0.1

The calculation results are presented in tables 3.2 and 3.3 and in figures 3.1 and 3.2.

Table 3.2 – Values of the weighted average mass number, the number of stages of the cascade and the values of the flows of light and heavy fractions of the 1st stage of separation

Weighted average mass number	$\bar{M}$ , Da	104.5
Number of stages in the enrichment and regenerative parts of the cascade	$S_P$	41
	$S_W$	94
Light and heavy fraction flows	$P$ , g/s	32.31
	$W$ , g/s	2.69

Table 3.3 – Values of the dimensionless coefficient  $Q$  and the concentrations of the mixture components in the flows of the light and heavy fractions of the cascade of the 1st stage of separation

	$\text{SiF}_4(^{28}\text{Si})$	$\text{SiF}_4(^{29}\text{Si})$	$\text{SiF}_4(^{30}\text{Si})$
Dimensionless coefficient, $Q$	0.1	-0.1	-0.3
The concentration of the components of the mixture in the product flow, $C_P$ , %	99.92	0.08	$1,52 \cdot 10^{-5}$
The concentration of the components of the mixture in the waste flow, $C_W$ , %	0.1	59.86	40.04

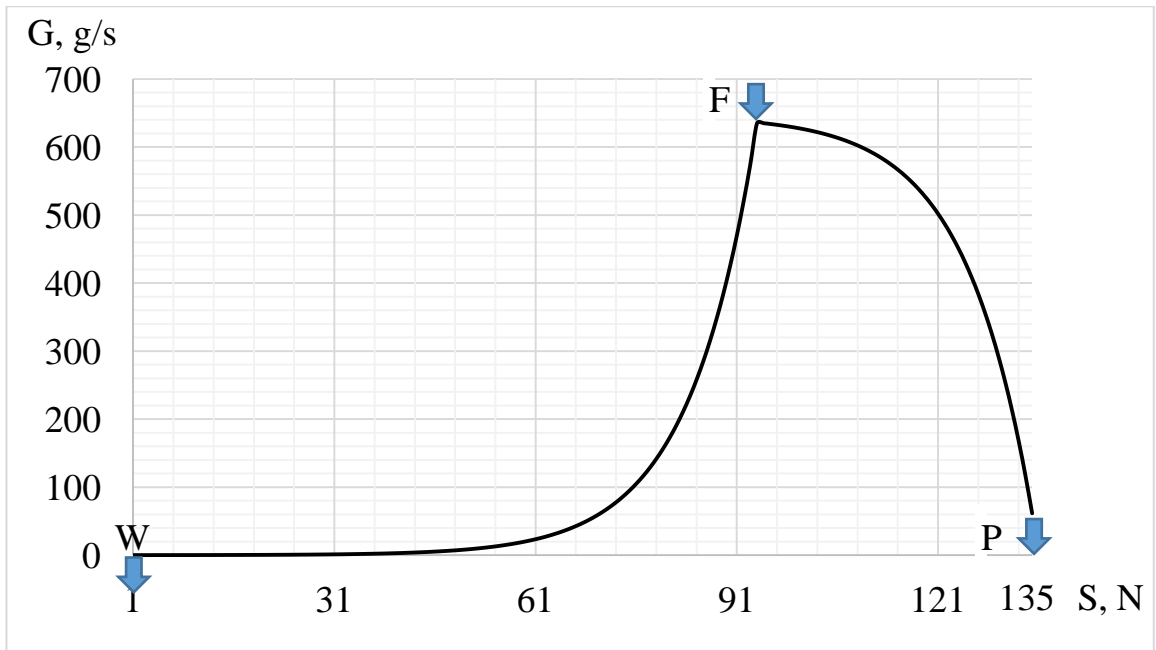


Figure 3.1 – Profile of the cascade of the 1st stage of separation

Figure 3.1 and Table 3.2 show that the number of stages in the depletion and enrichment parts of the cascade is 41 and 94, respectively. In this case, the cascade profile is continuous. The maximum value of the partial flow is reached at the feed stage of 635 g/s.

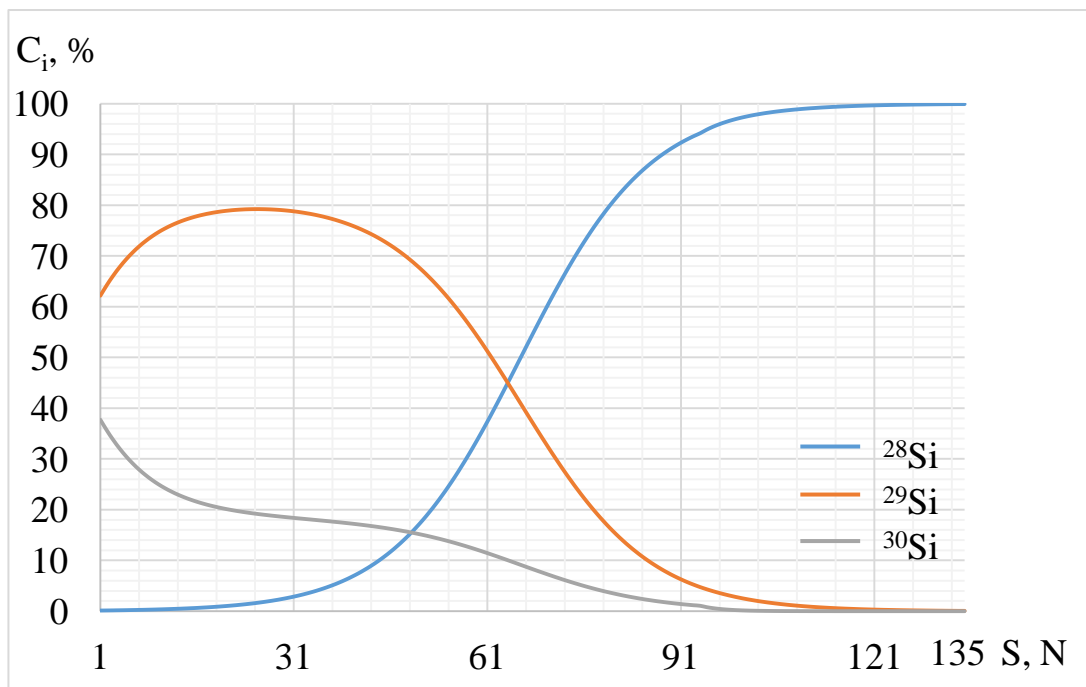


Figure 3.2 – Distribution of the concentrations of the mixture components by stages of the cascade of the 1st stage of separation



Table 3.3 and Figure 3.2 show that the required concentration of  $^{28}\text{Si}$  (99.9%) in the light fraction stream can be achieved in the first stage of separation. In this case, the  $^{28}\text{Si}$  concentration in the heavy fraction flow does not exceed 0.1%; therefore, it can be assumed that the isotopic mixture in the heavy fraction flow conditionally contains two isotopes:  $^{29}\text{Si}$  and  $^{30}\text{Si}$ .

It is expedient to use the heavy fraction stream for separating  $^{29}\text{Si}$  and  $^{30}\text{Si}$  in order to obtain two highly enriched products from this mixture as a result of the second separation stage.

The data for the calculation of the 2nd stage of separation are given in Table 3.4.

The calculation of the 2nd stage of separation was carried out according to the scheme presented in Figure 1.2. In this case, the feed stream was the heavy fraction withdrawal stream of the first separation stage cascade.  $^{30}\text{Si}$  was set as the target isotope. The calculation results are presented in tables 3.5 and 3.6 and in figures 3.3 and 3.4.

Table 3.4 – Data for calculating the cascade of the 2nd stage of separation

Masses of the components of the mixture	$M(\text{SiF}_4)^{28}\text{Si}$ , Da	104
	$M(\text{SiF}_4)^{29}\text{Si}$ , Da	105
	$M(\text{SiF}_4)^{30}\text{Si}$ , Da	106
Enrichment coefficient, $\varepsilon$		0.2
Flow division coefficient, $\theta$		0.5
Feed flow, $F$ , g/c		2.69
The concentration of the components of the mixture in the feed flow	$C_f(^{28}\text{Si})$ , %	0.1
	$C_f(^{29}\text{Si})$ , %	59.86
	$C_f(^{30}\text{Si})$ , %	40.04
Required concentrations of the target component in the flows of light and heavy fractions of the cascade	$C_p(^{30}\text{Si})$ , %	0.1
	$C_w(^{30}\text{Si})$ , %	99.9

Table 3.5 – Values of the weighted average mass number, the number of stages of the cascade and the values of the flows of the light and heavy fractions of the 2nd stage of separation

Weighted average mass number	$\bar{M}$ , Da	105.5
Number of stages in the enrichment and regenerative parts of the cascade	$S_P$	65
	$S_W$	74
Light and heavy fraction flows	$P$ , g/s	1.61
	$W$ , g/s	1.08

Table 3.6 – Values of the dimensionless coefficient  $Q$  and the concentrations of the mixture components in the flows of the light and heavy fractions of the cascade of the 2nd stage of separation

	$\text{SiF}_4(^{28}\text{Si})$	$\text{SiF}_4(^{29}\text{Si})$	$\text{SiF}_4(^{30}\text{Si})$
Dimensionless coefficient, $Q$	0.3	0.1	-0.1
The concentration of the components of the mixture in the product flow, $C_p$ , %	0.16	99.74	0.1
The concentration of the components of the mixture in the waste flow, $C_w$ , %	$5.6 \cdot 10^{-11}$	0.09	99.9

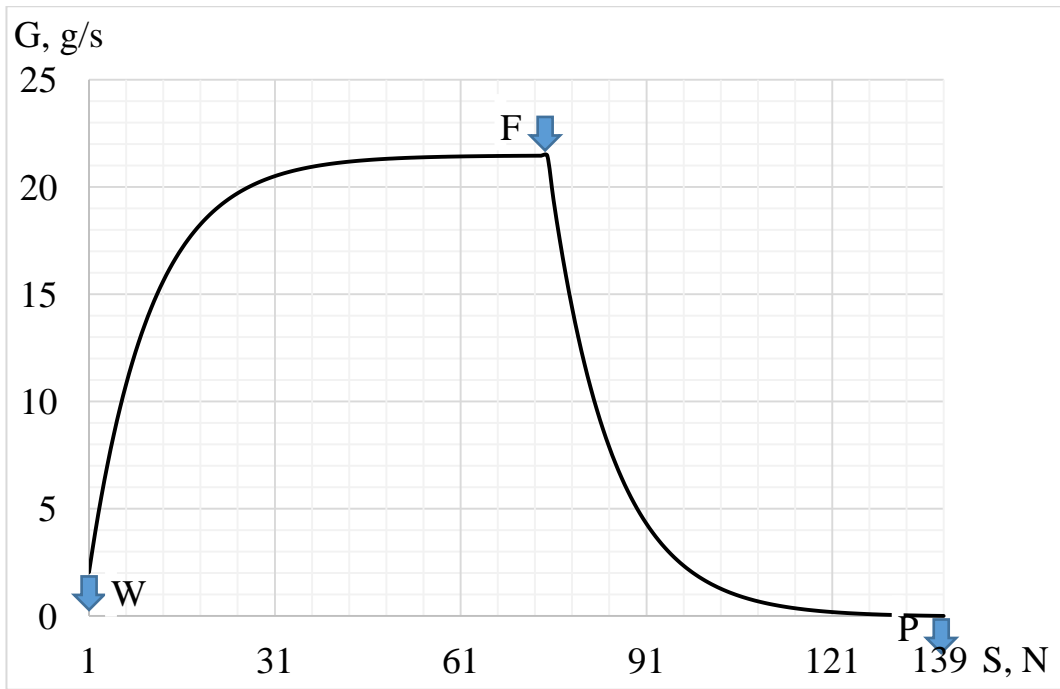


Figure 3.3 – Profile of the cascade of the 2nd stage of separation

Figure 3.3 and Table 3.5 show that the number of stages in the depletion and enrichment parts of the cascade is 65 and 74, respectively. The maximum value of the partial flow is reached at the feed stage of 21.46 g/s.

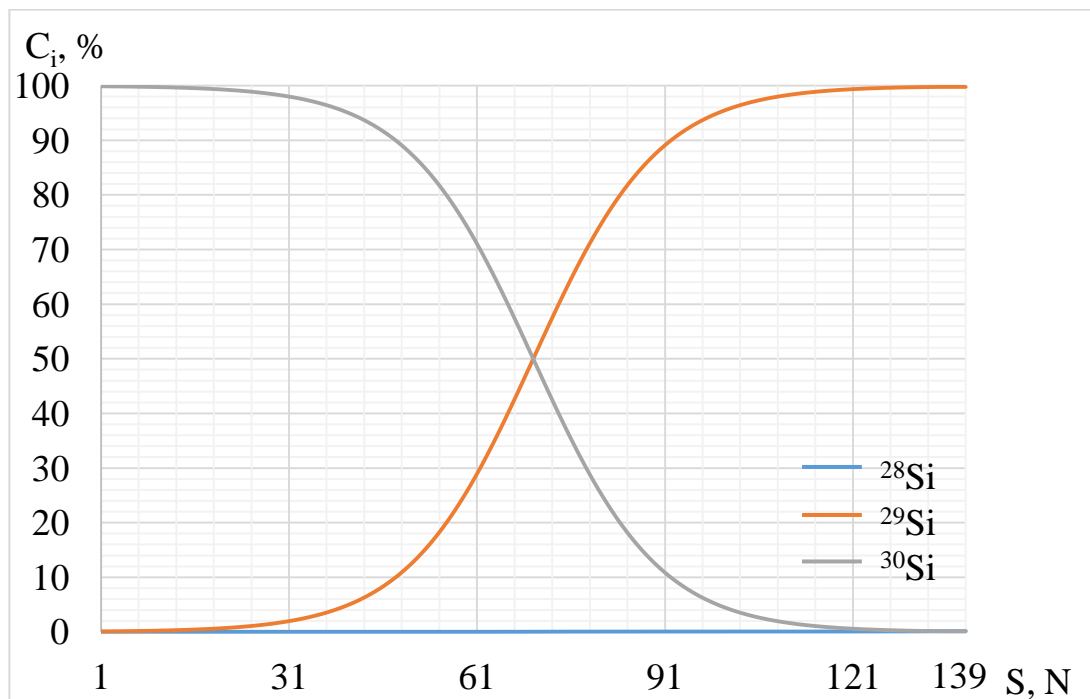


Figure 3.4 – Distribution of the concentrations of the mixture components by stages of the cascade of the 2nd stage of separation

It can be seen from the data in Table 3.6 and Figure 3.4 that at the 2nd stage of separation in the flow of the heavy fraction of the cascade, it is possible to achieve the specified concentration of  $^{30}\text{Si}$  (99.9%). In this case, the concentration of  $^{29}\text{Si}$  equal to 99.74% is reached in the flow of the light fraction of the cascade.

Thus, it has been shown that, using two-stage separation according to a multi-stage scheme with an initial feed flow of 35 g/s, it is possible to obtain three highly enriched products  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ , and  $^{30}\text{Si}$  with flows of 32.31 g/s, 1.61 g/s and 1.08 g/s, respectively.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0AM11	Петрову Максиму Вениаминовичу

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

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Бюджет проекта – не более 150000 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 100000 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Районный коэффициент для города Томска равен 1,3. Премияльный коэффициент равен 0,3.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды- 30,2%

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

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	1. Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; 2. SWOT-анализ.
1. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1. Цели и результат проекта; 2. Организационная структура проекта; 3. Ограничения и допущения проекта.
2. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки: организация работ НИ; определение структуры работ; разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на НИ: материальные затраты; заработная плата; отчисления во внебюджетные фонды.
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	1. Определение интегрального финансового показателя разработки; 2. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3. Определение интегрального показателя эффективности; 4. Оценка абсолютной эффективности НИ.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. <i>Сегментирование рынка</i>
2. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
3. <i>Матрица SWOT</i>
4. <i>Иерархическая структура работ</i>
5. <i>Календарный план-график проведения научного исследования</i>
6. <i>Диаграмма Ганта</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	27.01.2023
---	------------

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0AM11	Петров Максим Вениаминович		

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

Цель данного раздела – определение экономических затрат проведения расчета  $Q$ -каскада для разделения  $^{28}\text{Si}$  с учетом дальнейшего использования расчетов в проектировании реального каскада. Расчет параметров каскада проводился с использованием персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ), интерпретируемого языка программирования Python и интерактивного блокнота Jupyter, что позволяет в перспективе использовать проделанную работу в учебных целях для закрепления знаний, полученных на лекционных занятиях.

В данном разделе приводятся решения следующих задач:

- оценка конкурентоспособность технических решений;
- SWOT-анализ;
- планирование научно-исследовательской работы;
- расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- расчет и оценка сравнительной финансовой эффективности исследования.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

## 4.1 Предпроектный анализ

### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Данная работа включает в себя расчет Q-каскада для получения высокообогащенного  $^{28}\text{Si}$  с учетом того, что компоненты разделения изотопной смеси будут участвовать в дальнейшем обогащении.

Проведенная работа направлена на следующие целевые рынки, основная цель которых – производство и применение стабильных изотопов:

- государственные корпорации по атомной промышленности;
- атомная и смежные отрасли научной промышленности;
- области производства.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данных расчетов. Результаты сегментирования представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сегментирование рынка услуг по производству стабильных изотопов

		Расчет параметров модели Q-каскада для получения высокообогащенного $^{28}\text{Si}$			
		Атомная промышленность	Научная отрасль	Иные производственные отрасли	Экспорт $^{28}\text{Si}$
Потребность	Сильная				
	Слабая				

Как видно из таблицы 4.1. сильная заинтересованность в проведенной работе у атомной промышленности и научной отрасли.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Одним из главных преимуществ проделанной работы является возможность ее использования при проектировании реального каскада. Математическая модель Q-каскада верифицирована, что позволяет использовать ее в расчете, при котором полученные параметры будут приближены к реальным. Конкуренты работы:

- Экспериментальные исследования в области оптимизации разделительного каскада по получению высокообогащенного  $^{28}\text{Si}$  ( $K_{K1}$ );
- Теоретический расчёт параметров с применением других модельных каскадов (R-каскад, Q-каскад) ( $K_{K2}$ ).

Оценочная карта анализа представлена в таблице 4.2. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

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

где  $K$ – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $B_i$ – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$ – балл  $i$ -го показателя [65].

Для оценки конкурентных решений были выбраны следующие критерии:

- удобство эксплуатации;
- экономичность;
- надежность;
- закрытость получаемых данных;
- потребность в материальных ресурсах;
- стабильность;
- доступность;
- конкурентоспособность;



- затраты на разработку;
- предполагаемый срок эксплуатации;
- финансирование разработанного метода.

В оценочной карте (таблица 4.2) для проведения сравнения выбрано три варианта технических решений проблемы расчета каскадов разделения:

вариант 1 – расчеты, основанные на эмпирических данных реальных установок;

вариант 2 – расчеты R-каскада как аналогичный вариант предварительного расчета реального каскада;

вариант 3 – расчет Q-каскада с менее жесткими требованиями.

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Удобство эксплуатации	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
2. Экономичность	0,03	5	2	3	0,15	0,06	0,09
3. Надежность	0,06	5	4	3	0,3	0,24	0,18
4. Закрытость получаемых данных	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
5. Потребность в материальных ресурсах	0,05	5	1	4	0,25	0,05	0,2
6. Стабильность	0,2	5	3	3	1	0,6	0,6
7. Доступность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Затраты на разработку	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,14
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,12	5	1	3	0,6	0,12	0,36
3. Финансирование разработанного метода	0,2	5	2	3	1	0,4	0,6
Итого	1				4,95	2,83	3,2

Важными показателями являются: стабильность (0,6 и 0,6 балла); доступность (0,4 и 0,4 балла); удобство эксплуатации (0,6 и 0,45 балла).

Менее важными критериями были выбраны: экономичность (0,06 и 0,09 балла); потребность в материальных ресурсах (0,05 и 0,2 балла); затраты на разработку (0,16 и 0,12 балла).

Приведенный анализ показывает, что проведенный расчет является оптимальной для использования в практических целях.

#### 4.1.3 SWOT-анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [65, 66].

Составлена матрица SWOT-анализа (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны проекта:</b>  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><b>Слабые стороны проекта:</b>  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><b>Возможности:</b>  В1. Использование модели для исследований.  В2. Расширение возможностей расчётной модели.  В3. Возможность исследования различных изотопов молибдена  В4. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>		

Продолжение таблицы 4.3

<p><b>Угрозы:</b>          У1. Низкий спрос со стороны предприятий.          У2. Вероятность разработки подобных расчётных моделей другими организациями.          У3. Сложность в продвижении модели среди консервативно настроенных предприятий          У4. Разработка новейших моделей расчёта.</p>		
---	--	--

В таблице 4.4 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями.

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта

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

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

В результате составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны проекта:</b>          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><b>Слабые стороны проекта:</b>          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><b>Возможности:</b>          В1. Использование модели для исследований.          В2. Расширение возможностей расчётной модели.          В3. Возможность исследования различных изотопов молибдена          В4. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>	<p>1. Полное обеспечение условий для создания и применения модели для расчётов.          2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики и использованием современных расчётных моделей.          3. Высокая точность получаемых результатов расчета распределения концентраций по ступеням позволяет повысить спрос на расчётную модель</p>	<p>1. Необходимо экспериментальное подтверждение, что возможно реализовать в условиях вуза.          2. Закрытость расчётной модели не отражается на точности результатов.          3. Круг потребителей можно увеличить с помощью увеличения количества элементов.</p>
<p><b>Угрозы:</b>          У1. Низкий спрос со стороны предприятий.          У2. Вероятность разработки подобных расчётных моделей другими организациями.          У3. Сложность в продвижении модели среди консервативно настроенных предприятий          У4. Разработка новейших моделей расчёта.</p>	<p>1. Внедрение разработки в научные центры и институты позволит увеличить охват пользователей и заинтересованность предприятий.          2. Благодаря возможностям расчётной модели и своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным.          3. Так как существует возможность оптимизации расчётной модели и расширения выбора изотопов, то это позволит конкурировать с новейшими разработками.          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.          2. Несовершенства разработанной модели можно решить с помощью оптимизации модели под требуемые изотопы.</p>

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 значительно преобладают над её недостатками. 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 Инициализация проекта

В инициацию проекта входит информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта.

Информация о заинтересованных сторонах проекта, информация о целях и результатах проекта, рабочая группа проекта и ограничения проекта приведены в таблицах 4.6 – 4.9.

Таблица 4.6 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИИ	Использование расчетов для дальнейшей оптимизации Q-каскада по получению высокообогащенного $^{28}\text{Si}$
Компании атомной промышленности	Использование расчетов для проектирования реального каскада по получению высокообогащенного $^{28}\text{Si}$
Частные инвесторы	Получение максимальной доходности в зависимости от вложений

Таблица 4.7– Цели и результаты проекта

<b>Цели проекта:</b>	Создание, программной реализация расчета Q-каскада; расчет Q-каскада для получения высокообогащенного $^{28}\text{Si}$ .
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Создана, программа для расчета Q-каскада; рассчитан Q-каскада для получения высокообогащенного $^{28}\text{Si}$ .
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Получение результатов расчета параметров Q-каскада и их анализ
<b>Требования к результату проекта:</b>	Полученные результаты параметров Q-каскада должны удовлетворять значению концентрации $^{28}\text{Si}$ , приводимому в патенте [4].

Таблица 4.8 – Рабочая группа проекта

<b>ФИО, основное место работы, должность</b>	<b>Роль в проекте</b>	<b>Функции</b>
Орлов А.А., ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор	Руководитель	координация проекта; выбор направления исследования; составление и утверждения технического задания; календарное планирование работ; обобщение и оценка результатов.
Петров М.В., ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», магистрант	Исполнитель	выбор направления исследования; календарное планирование работ; обзор источников информации; проведение расчетов; составление отчета; анализ полученных данных; подведение итогов.

Таблица 4.9 – Ограничения проекта

<b>Фактор</b>	<b>Ограничения/допущения</b>
Бюджет проекта	Не должен превышать 150 000 руб.
Источник финансирования	Средства ФГАОУ ВО НИ ТПУ.
Сроки проекта	Задание на выполнение исследований должно быть утверждено к 15.02.2023. Работа должна быть выполнена к 20.05.2023
Прочие ограничения и допущения	Ограничение рабочего времени участников проекта (руководителя и исполнителя).

## 4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

### 4.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. ИСР приведена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Иерархическая структура работ

### 4.3.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2023	Приказ по ИЯТШ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2023	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2023	
4	Подбор и изучение материалов по теме	7.02.2023	Отчет
5	Календарное планирование работ	12.02.2023	План работ

Продолжение таблицы 4.10.

6	Изучение возможностей расчетной модели	13.02.2023	Отчет
7	Освоение методики расчета на практике	14.02.2023	Отчет
8	Проведение расчетов	15.02. 2023-28.03.2023	Отчет
9	Анализ полученных данных	29.03.2023	Отчет
10	Обобщение и оценка результатов	30.03.2023	Отчет
11	Составление пояснительной записки	1.04.2023-25.04.2023	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2023	Пояснительная записка
13	Подготовка к защите	27.04.2023-22.05.2023	

### 4.3.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ [65, 67].

Линейный график и календарный план-график проведения научного исследования представлены в таблицах 4.11 и 4.12 соответственно.

Таблица 4.11 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	2	1.02.2023	2.02.2023	Руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	2	3.02.2023	4.02.2023	Руководитель
3	Выбор направления исследований	3	5.02.2023	7.02.2023	Руководитель, исполнитель
4	Подбор и изучение материалов по теме	3	8.02.2023	10.02.2023	Исполнитель





Продолжение таблицы 4.11.

5	Календарное планирование работ	3	11.02.2023	13.02.2023	Руководитель, исполнитель
6	Изучение возможностей расчетной модели	1	14.02.2023	14.02.2023	Исполнитель
7	Освоение методики расчета на практике	1	15.02.2023	15.02.2023	Исполнитель
8	Проведение расчетов	41	16.02.2023	28.03.2023	Исполнитель
9	Анализ полученных данных	1	29.03.2023	29.03.2023	Исполнитель
10	Обобщение и оценка результатов	1	30.03.2023	30.03.2023	Руководитель, исполнитель
11	Составление пояснительной записки	25	1.04.2023	25.04.2023	Исполнитель
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	2	26.04.2023	27.04.2023	Руководитель, исполнитель
13	Подготовка к защите	56	27.04.2023	22.06.2023	Исполнитель

Таблица 4.12 – Календарный план-график проведения научного исследования

№	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Разработка технического задания	Руководитель	2	1													
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2	2													
3	Выбор направления исследований	Руководитель, исполнитель	3	3													
4	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель	3		1												
5	Календарное планирование работ	Руководитель, исполнитель	3		2												
6	Изучение возможностей расчетной модели	Исполнитель	1		1												
7	Освоение методики расчета на практике	Исполнитель	1		1												
8	Проведение расчетов	Исполнитель	41			1	2	3									
9	Анализ полученных данных	Исполнитель	1					1									
10	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, исполнитель	1					1									
11	Составление пояснительной записки	Исполнитель	25						1	2	3						
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, исполнитель	2									1	2				
13	Подготовка к защите	Исполнитель	26											1	2	3	

 – Руководитель  – Исполнитель

#### 4.4 Бюджет научного исследования

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

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

##### 4.4.1 Расчет материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi} , \quad (4.2)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;  $N_{расxi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);  $C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);  $k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15–25% от стоимости материалов [65, 66].

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию. Программное обеспечение по образовательным лицензиям бесплатное. Результаты расчетов по затратам на материалы приведены в таблице 4.13.

Затраты на электроэнергию для работы ПЭВМ рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об}, \quad (4.3)$$

где  $C_{эл}$  – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);  $P$  – мощность оборудования, кВт;  $F_{об}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 2784 рубля.

Таблица 4.13 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электроэнергия		480 кВт·ч	5,8	2784
Программное обеспечение: Интерактивный блокнот Jupyter; Язык программирования Python		4 месяца	0	0
Всего за материалы				2784
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого по статье $C_m$				2784

#### 4.4.2 Расчет амортизации оборудования

В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов (таблица 4.14). Все работы проводились на персональном компьютере.

Таблица 4.14 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Персональный компьютер	1	3	45000	45000
<b>Итого:</b>	45000руб.				

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.4)$$

где  $n$  – срок полезного использования, лет.

Амортизация рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m, \quad (4.5)$$

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

Рассчитаем амортизацию для персонального компьютера, с учётом, что срок полезного использования 3 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{3} = 0,33$$

Сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \cdot И}{12} \cdot 4 = \frac{0,33 \cdot 45000}{12} \cdot 4 = 4950 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 4950$$

В данном разделе проведен расчёт амортизации оборудования. Амортизация для персонального компьютера, с учётом, что срок полезного использования 3 года составила 0,33, а общая сумма амортизационных отчислений 4950 рублей.

#### 4.4.3 Основная заработная плата исполнителей темы

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.6)$$

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

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (4.7)$$

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{дн} = (Z_M \cdot M) / F_d, \quad (4.8)$$

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

- 1) при отпуске в 24 раб.дня  $M=11,2$  месяца, 5-дневная неделя;
- 2) при отпуске в 48 раб.дней  $M=10,4$  месяца, 6-дневная неделя;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.15).

Таблица 4.15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни/праздничные дни	66	66
Потери рабочего времени:		
– отпуск/невыходы по болезни	56	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	251

Исполнитель ежемесячно получает вознаграждение в размере МРОТ 13890 руб.

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 35000 рублей (без учета РК).

Для расчета месячного должностного оклада работника применяется формула:

$$Z_m = Z_{ок} \cdot k_p, \quad (4.9)$$

где  $Z_{ок}$  – заработная плата по окладу, руб.;  $k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Зарботная плата исполнителей приведена в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Зарботная плата исполнителей исследовательской работы

Исполнители	$Z_{ок}$ , руб.	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_{раб}$	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	35000	1,30	45500	2240	8 д.	17920
Исполнитель	13890	1,30	18057	863	63д.	54369
Итого $Z_{осн}$ :	72289 руб.					

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Примем коэффициент дополнительной заработной платы для научного руководителя равным 15%. Тогда дополнительная зарплата руководителя 2688 рублей, а исполнителя 8155 рублей.

Суммарная зарплата руководителя 20608 рублей, исполнителя 62524 рублей.

#### 4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.10)$$

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

Таким образом отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда руководителя вычисляются следующим образом:

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 20608 = 6223 \text{ руб.}$$

Отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда исполнителя вычисляются следующим образом:

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 62524 = 18882 \text{ руб.}$$

В результате расчётов определены отчисления во внебюджетные фонды от затрат на оплату труда руководителя и исполнителя, при том, что коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды составил 0,302. Для руководителя, отчисления составили 6223 руб., а для исполнителя 18882 рубля.

#### 4.4.5 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.11)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

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

Примем  $k_{\text{накл}} = 16\%$ .

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (20608 + 62524) = 13301 \text{ руб.}$$



#### 4.4.6 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Расчет бюджета затрат исследовательского проекта

Материальные затраты	2784 руб.
Амортизационные отчисления	4950 руб.
Основная заработная плата	72289 руб.
Дополнительная заработная плата	10843 руб.
Страховые взносы	25105 руб.
Итого без накладных расходов	115971 руб.
Накладные расходы	13301 руб.
Итого бюджетная стоимость	129272 руб.

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

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.12)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;  $b_i^a, b_i^b$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности данного исследования представлен в таблице 4.18. В качестве аналога выступает расчет R-каскада, как второй метод расчета каскада.

Таблица 4.18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1.Экономичность	0,15	4	3
2.Удобство в эксплуатации	0,15	5	4
3. Закрытость получаемых данных	0,15	4	4
4. Доступность	0,1	5	4
5. Надежность	0,25	4	4
6. Затраты на разработку	0,2	4	3
Итого	1	4,25	3,65

$$I_p = 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 4,25 ;$$

$$I_a = 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 = 3,65 .$$

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле  $I_{\phi}^p = \frac{\Phi_i}{\Phi_{\max}}$ , где  $\Phi_i$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{\max}$  – максимальная стоимость исполнения НТИ.

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{\max}} = \frac{312572}{350000} = 0,89 ;$$

$$I_{\phi}^a = \frac{\Phi_a}{\Phi_{\max}} = \frac{180000}{200000} = 0,9 .$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{\text{финр}}^p$ ) и аналога ( $I_{\text{финр}}^a$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формулам

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_p}{I_{\phi}^p}, \quad (4.13)$$

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_a}{I_{\phi}^a} \quad (4.14)$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,25}{0,89} = 4,77 ;$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_a}{I_\phi^a} = \frac{3,65}{0,9} = 4.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта (таблица 4.19) определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_p}. \quad (4.15)$$

Таблица 4.19 – Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Аналог	Разработка
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки и аналогов	3,65	4,25
Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки и аналога	4	4,77
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,09	1,12

На основе расчета интегрального показателя с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности научного исследования можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

#### **4.6 Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»**

1. В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» согласно анализу конкурентных технических решений установлено, что конкурентные методы имеют ряд недостатков, исключаемых разработанной моделью. Проведенный расчет  $Q$ -каскада для получения высокообогащенного  $^{28}\text{Si}$  позволяет существенно снизить финансовые затраты при проектировании реального каскада.

2. В ходе планирования научно-исследовательских работ определен перечень работ, выполняемый рабочей группой. В данном случае рабочая группа состоит из двух человек: руководитель (Орлов А.А.) и исполнитель (Петров М.В.). На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – это составление пояснительной записки и подготовка к защите работы.

3. Бюджет исследования составил 129272 руб, в том числе заработная плата 83132 руб. и накладные расходы 13301 руб.

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

5. Оценка абсолютной эффективности НИ показала, что проект является эффективным с точки зрения целесообразности инвестирования денежных средств, со сроком окупаемости 2,26 года.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0AM11	Петрову Максиму Вениаминовичу

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

### 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:

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 19.12.2022);</li> </ul>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные и опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– отклонение показателей микроклимата;</li> <li>– повышенный уровень электромагнитных излучений;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– психофизиологические факторы;</li> <li>– опасность поражения электрическим током.</li> </ul>
<p><b>4. Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– выбор и описание типичной АСиЧС – пожар, удар током, падение с высоты собственного роста;</li> <li>– обоснование мероприятий по предотвращению АСиЧС;</li> <li>– порядок действий при возникновении АСиЧС.</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	27.01.2023
--	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0AM11	Петров М.В.		

## **5 Социальная ответственность**

Работа выполнялась в аудитории № 246 10 корпуса НИ ТПУ на базе Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий.

Результатом работы является расчет параметров  $Q$ -каскада для разделения  $^{28}\text{Si}$ . Расчет параметров каскада проводился с использованием ПЭВМ, интерпретируемого языка программирования Python и интерактивного блокнота Jupyter. Расчет оформлен в виде программного кода, что позволяет в будущем проводить расчеты  $Q$ -каскада для выбранных начальных значений. Данную программу можно использовать в учебных целях для закрепления знаний, полученных на лекционных занятиях.

В разделе рассмотрены опасные и вредные факторы, оказывающие влияние на процесс исследования, 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. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации, каждый работник имеет право на:

- 1) рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- 2) обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- 3) 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;

4) отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;

5) обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;

6) обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;

7) 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;

8) внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

9) 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.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником [68].

### **5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя**

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно

располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как изображено на рисунке 5.1 [69].

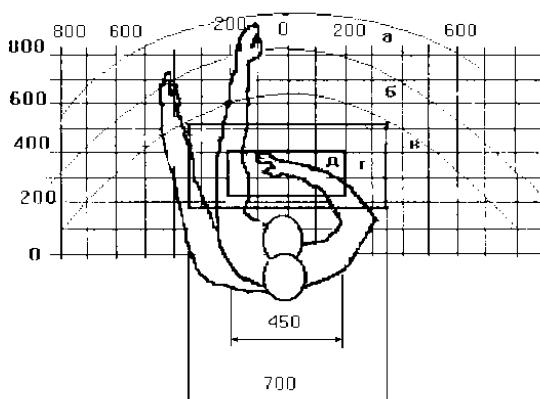


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- 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:

- 1) дисплей размещается в зоне «а» (в центре);
- 2) клавиатура - в зоне «г» и «д»;
- 3) системный блок размещается в зоне «б» (слева);
- 4) принтер находится в зоне «а» (справа);
- 5) литература и документация, необходимая при работе находится в зоне легкой досягаемости ладони – «в» (слева);
- б) в выдвижных ящиках стола - литература, не используемая постоянно.

Требования к оснащению рабочего места приведены в таблице 5.1 [69].



Таблица 5.1 – Требования к оснащению рабочего места, предусматривающего длительную работу за ПК

Ширина рабочего стола	От 80 до 140 см
Высота рабочего стола	75 см
Глубина рабочего стола	От 60 до 80 см
Расстояние от глаз до монитора	От 50 до 60 см
Расстояние клавиатуры от края стола	От 10 до 30 см
Сидение	Должно позволять регулировку по высоте, повороту и углу наклона спинки (регулировки должны быть независимыми друг от друга)
Пространство для ног	Ширина от 30 см, глубина – от 40 см, с углом наклона до 20 градусов

Монитор должен располагаться на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [69].

Также должна предусматриваться возможность регулировки экрана монитора [69]:

- 1) по высоте +3 см;
- 2) наклон относительно вертикали 10-20 градусов;
- 3) в левом и правом направлениях.

Клавиатуру должна располагаться на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края, на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

В случае если работа оператора предполагает однообразную умственную работу, которая требует значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, то лучше всего выбирать неяркие,

малоконтрастные цветовые оттенки, которые не ослабляют внимание. Если работа требует большой умственной и физической напряженности, тогда следует использовать более теплые оттенки, которые способствуют повышению концентрации внимания [69].

## 5.2 Производственная безопасность

### 5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов

Группы производственных условий, характеризующиеся наличием опасных и вредных факторов:

- 1) физические;
- 2) химические;
- 3) психофизиологические;
- 4) биологические.

Опасные и вредные факторы, воздействующие на персонал при работе с ПЭВМ приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548-96. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [70]
2. Повышенный уровень электромагнитного излучения	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности [71]
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (от 28 января 2021 г. № 2) [72]
4. Превышение уровня шума	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [73]

Продолжение таблицы 5.2.

5. Психофизиологические факторы	СП 2.4.3648-20 Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи : утв. Министерством юстиции Российской Федерации от 18.12.2020 № 61573 [69]
6. Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [74]
7. Пожаровзрывоопасность	ГОСТ 12.1.044-2018 ССБТ Пожаровзрывоопасность веществ и материалов [75]

К психологически вредным факторам, воздействующим на персонал, относятся [72]:

- 1) нервно - эмоциональные перегрузки;
- 2) умственное напряжение;
- 3) физические перегрузки.

Биологические и химические вредные производственные факторы отсутствуют.

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

В соответствии с санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ должна составлять не менее 6 м<sup>2</sup> [69].

### **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 5.3.

Таблица 5.3 – Оптимальные параметры микроклимата

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

Отклонение показателей микроклимата от нормы может приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажностью воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования [69].

Параметры микроклимата, в аудитории № 246, регулируются системой центрального отопления. К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. Оптимальная кратность воздухообмена в производственных помещениях находится в достаточно широких пределах: от 3 до 40 раз в час [69]. В используемой лаборатории установлен высоконапорный вытяжной вентилятор марки ВР-12-26-4 производительностью  $Q = 2400 - 4400 \text{ м}^3/\text{час}$ . Объем лаборатории составляет:

$$V = a \cdot b \cdot h = 4 \text{ м} \cdot 5 \text{ м} \cdot 6 \text{ м} = 120 \text{ м}^3. \quad (5.1)$$

Данный вентилятор обеспечивает следующую кратность воздухообмена ( $BO$ ) в лаборатории:

$$BO = \frac{Q}{V} = \frac{2400 \div 4400}{120} = 20 \div 36,7. \quad (5.2)$$

Таким образом установлено, что микроклимат в используемой аудитории №246 соответствует оптимальным условиям работы [69].

#### 5.2.4 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 соответствовать таблице 5.4.

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека: приводить к нервным расстройствам; нарушению сна; значительному ухудшению зрительной активности; ослаблению иммунной системы; расстройствам сердечно-сосудистой системы [71].

Таблица 5.4 – Допустимые уровни параметров электромагнитного поля

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряженность электромагнитного поля	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл

Для защиты от ЭМП увеличивают расстояние от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя).

### 5.2.5 Недостаточная освещенность рабочей зоны

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

По нормативам [72] освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Коэффициент запаса (Кз) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения.

В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы:

- 1) комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники;
- 2) местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов) [72].

Площадь помещения:

$$S = a \cdot b, \quad (5.3)$$

где А – длина, м; В – ширина, м.

$$S = 4 \cdot 5 = 20 \text{ м}^2,$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор  $\rho_c = 50 \%$ , свежепобеленного потолка  $\rho_{II} = 70 \%$ . Коэффициент запаса,

учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_3 = 1,5$ . Коэффициент неравномерности для светодиодных лент  $Z = 1,1$ .

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

Выбираем светильники со светодиодами типа Dioga 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  $\lambda$ , 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:

$$h = h_n - h_p, \quad (5.4)$$

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:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2 \text{ м.} \quad (5.5)$$

Из формулы

$$\Phi_n = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta} \quad (5.6)$$

где  $E$  – минимальная нормированная освещенность;  $K_3 = 1,5$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, наличие в атмосфере дыма, пыли;  $i$  – коэффициент использования светового потока;  $n$  – количество ламп

в светильнике;  $\Phi_l$  – световой поток одной лампы, находим число светодиодных лент  $N$ , находим число светодиодных лент  $N$ :

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_l \cdot \eta} \quad (5.7)$$

$\eta$  определяем через индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{(a \cdot b)}{h \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot 5}{2 \cdot (4 + 5)} = 1,1. \quad (5.8)$$

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

Тогда

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

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

Потребный световой поток светодиодных ламп:

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

Из условий равномерности освещения определяем расстояния  $L_1$  и  $\frac{L_1}{3}$ ,

$L_2$  и  $\frac{L_2}{3}$  по следующим уравнениям:

$$4000 = L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + 2 \cdot 124; L_1 = 2251 \text{ мм, } \frac{L_1}{3} = 750 \text{ мм;} \quad (5.9)$$

$$5000 = L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_2 + 2 \cdot 1260; L_2 = 1488 \text{ мм, } \frac{L_2}{3} = 496 \text{ мм;} \quad (5.10)$$

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



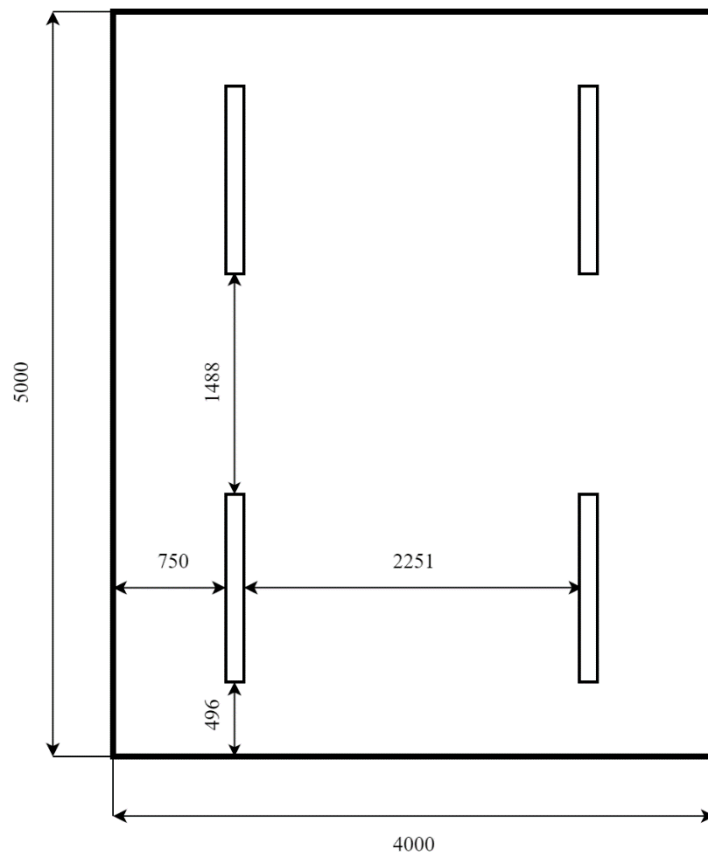


Рисунок 5.2 – План помещения и размещения светильников со светодиодными лентами

Делаем проверку выполнения условия:

$$\frac{-10\% \leq (\Phi_{л\partial} - \Phi_{л})}{\Phi_{л\partial}} \cdot 100\% \leq 20\%; \quad (5.11)$$

$$\frac{(\Phi_{л\partial} - \Phi_{л})}{\Phi_{л\partial} \cdot 100\%} = \frac{(2900 - 2750)}{2900} \cdot 100\% = 5,17\%.$$

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.

### 5.2.6 Превышение уровня шума

Шум является общебиологическим раздражителем. Шум оказывает влияние на слуховой анализатор, действует на структуры головного мозга, вызывая сдвиги в различных функциональных системах организма. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБа.

Выделяют следующие неблагоприятные воздействия шума на организм человек: снижение разборчивости речи; неприятные ощущения; развитие утомления; снижение производительности труда; появление шумовой патологии.

В таблице 5.5 приведены нормы уровня шума при различных видах работ [73].

Таблица 5.5 – Нормативы уровня шума при различных видах работ

	Максимально допустимый уровень шума (дБ), в полосах следующих октав (Гц)									
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	60

### 5.2.7 Психофизиологические факторы

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

Трудовая деятельность работников непромышленной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым

принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает функциональную 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 [68].

#### **5.2.8 Поражение электрическим током**

Рабочее помещение по опасности поражения электрическим током можно отнести ко 1 классу, т.е. это помещение без повышенной опасности из-за возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой [74].

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

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

Степень опасного воздействия электрического тока на организм человека зависит от:

- 1) рода и величины напряжения и тока;
- 2) частоты электрического тока;
- 3) пути прохождения тока через тело человека;
- 4) продолжительности воздействия на организм человека;
- 5) условий внешней среды.

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов и других органов, в результате чего в них возникают функциональные расстройства.

Электролитическое действие тока характеризуется разложением крови и других органических жидкостей, что вызывает нарушения их физико-химического состава.

Механическое действие тока проявляется в повреждениях (разрыве, расслоении и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта.

Биологическое действие тока на живую ткань выражается в опасном возбуждении клеток и тканей организма, сопровождающемся произвольными судорожными сокращениями мышц. В результате такого возбуждения может возникнуть нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения.

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- 1) обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования;
- 2) применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- 3) использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения [76];
- 4) использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год [74].

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

### **5.2.9 Пожарная и взрывная безопасность**

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

Возможные причины возгорания [77]:

- 1) работа с открытой электроаппаратурой;
- 2) короткие замыкания в блоке питания;
- 3) несоблюдение правил пожарной безопасности;
- 4) наличие горючих компонентов.

Наиболее опасным с точки зрения пожарной безопасности веществом, применяемым в 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 [77].

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные [77].

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 [77].

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования [77].

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [77]:

- 1) исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- 2) правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

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

4) обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

5) издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

6) соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

7) правильное размещение оборудования;

8) 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 [77]:

1) сообщить руководству (дежурному);

2) позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС по телефону – 112;

3) принять меры по ликвидации последствий аварии в соответствии с инструкцией.

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

Аварийные и чрезвычайные ситуации (АСиЧС) – 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.

В таблице 5.6 рассмотрены аварийные и чрезвычайные ситуации, методы по их предотвращению и ликвидация их последствий.

Таблица 5.6 – Аварийные и чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий

№	АСиЧС	Меры предотвращения АСиЧС	Меры по ликвидации последствий АСиЧС
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



#### **5.4 Вывод по разделу «Социальная ответственность»**

В разделе рассмотрены следующие вредные и опасные факторы помещения:

- 1) микроклимат [72];
- 2) шум [73];
- 3) электромагнитное излучение [71];
- 4) освещенность [72];
- 5) психофизиологические факторы [72];
- 6) электробезопасность [74];
- 7) пожаро-взрывобезопасность [77].

Помещение № 246 10 корпуса ТПУ отнесено:

- 1) по электробезопасности – к 1 классу [74];
- 2) по пожаро-взрывобезопасности – к категории В [77].

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

## Conclusions

1. As a result of the calculations of the 1st and 2nd stage of separation, the profiles of the corresponding  $Q$ -cascades and the dependence of the distribution of the concentration of silicon isotopes over their stages were obtained. It is shown that silicon isotopes are distributed over the stages of the cascade in accordance with their mass numbers.

2. The calculation of the parameters of the  $Q$ -cascade to obtain highly enriched  $^{28}\text{Si}$  showed that one stage of separation can produce  $^{28}\text{Si}$  with a concentration of 99.92% with a product flow of 32.31 g/s. The number of stages of the cascade was 135.

3. It is recommended to use the heavy fraction waste flow of the first separation stage for further enrichment of  $^{29}\text{Si}$  and  $^{30}\text{Si}$ , since the concentration of  $^{28}\text{Si}$  in this flow after the first separation stage is low (0.1%) and the mixture can be considered two-component.

4. In the second separation stage, using a multi-stage separation process in the light fraction waste flow, it is possible to reach a  $^{29}\text{Si}$  concentration of 99.74% with a product flow of 1.61 g/s. In the heavy fraction waste flow of the cascade, the  $^{30}\text{Si}$  concentration is 99.91% at a product flow value of 1.08 g/s. At the same time, the number of stages of the cascade of the second separation stage was 139.

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

## References

1. SHemlya M. Razdelenie izotopov : Perevod s francuzskogo him. nauk E. S. Petrova / M. SHemlya, ZH. Per'e. – M.: Atomizdat, 1980. – 168 p. – Text : direct.
2. Thermal conductivity of isotopically enriched Si / W. S. Capinski, H. J. Maris, E. Bauser [et al.]. – Text : electronic // Applied Physics Letters. – 1997. – Vol. 71, № 15. – pp. 2109-2111. – DOI 10.1063/1.119384.
3. Teoriya kaskadov dlya razdeleniya binarnyh i mnogokomponentnyh izotopnyh smesey : Uchebnoe posobie. / G. A. Sulaberidze, V. A. Palkin, V. D. Borisevich [et al.] : red. prof. V.D. Borman – M. : NIYAU MIFI, 2011. – 368 p. – ISBN 978-5-7262-1527-3.
4. Patent № 2693786S1 Rossijskaya Federaciya, MPK B01D 59/20 (2006.01). Sposob polucheniya osobochistogo vysokoobogashchennogo izotopa kremniya-28 : № 2018132790 : zayavl. 13.09.2018 : opubl. 04.07.2019 / A. A. Palienko, V. P. Sovach, A. A. Ushakov. – 8 p.
5. Grinvud N. Himiya elementov : V 2 t. : T. 1 / N. Grinvud, A. Ershno : perevod s anglijskogo. – M. : BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008. – 607 p. – ISBN 978-5-94774-372-2. – Text : direct.
6. A determination of the Avogadro constant / P. Sevfried, P. Becker, A. Kozdon [et al.] // Zeitschrift für Physik B Condensed Matter. – 1992. – Vol. 87, № 3. – pp. 289-298. – DOI 10.1007/BF01309282.
7. Olijnyk H. Structural phase transitions in Si and Ge under pressures up to 50 GPa / H. Olijnyk, S. K. Sikka, W. B. Holzapfel // Physics Letters A. – 1984. – Vol. 103, №. 3. – pp. 137-140. – DOI 10.1016/0375-9601(84)90219-6.
8. Kintzinger J.-P. Oxygen-17 and Silicon-29 / J.-P. Kintzinger, H. Marsmann. – Springer Berlin Heidelberg, 1981. – DOI 10.1007/978-3-642-87762 9
9. Golashvili, T. V. Spravochnik nuklidov / T. V. Golashvili, V. P. CHEchev, S. A. Badikov ; pod. red. T. V. Golashvili. – 4-e izd. , pererab. i dop. – M. : Izdatel'skij dom MEI, 2011. – 462 p. – ISBN 978-5-383-00513-2. – Text : electronic // EBS "Konsul'tant studenta" : [sajt]. – URL:

<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383005132.html> (date of the application: 22.05.2023). – Access mode : by subscription.

10. Lidin R.A.. Himicheskie svoystva neorganicheskikh veshchestv: Ucheb. Posobie dlya vuzov. 3-e izd., ispr. / R.A. Lidin, V.A. Molochko, L.L. Andreeva : pod red. R.A. Lidina. – M.: Himiya, 2000. – 480 p.

11. Proizvodstvennoe ob"edinenie «Elektrohimicheskij zavod» : oficial'nyj sajt AO «PO EKHZ». – 1999–2023. – URL: <https://www.ecp.ru/> (date of the application: 21.05.2023). – Text : electronic.

12. BuyIsotope. – 2012–2023. – URL: <https://www.buyisotope.com/> (date of the application: 21.05.2023). – Text : electronic.

13. Urenco : official site Urenco Group. – 2023. – URL: <https://www.urencocom.com/> (date of the application: 21.05.2023). – Text : electronic.

14. Thermal conductivity of isotopically enriched silicon / T. Ruf, R. W. Henn, M. Asen-Palmer [et al.]. – Text : electronic // Solid State Communications. – 2000. – Vol. 115, № 5. – pp. 243-247. – DOI 10.1016/S0038-1098(00)00172-1.

15. Sparavigna, A. C. Thermal Conductivity of the Crystalline Silicon / A.C. Sparavigna. – Text : electronic // Philica. – 2017. – URL: <https://hal.science/hal-01626126>.

16. Thermal conductivity of isotopically enriched  $^{28}\text{Si}$ : revisited / R.K. Kremer, K. Graf, M. Cardona [et al.]. – Text : electronic // Solid State Communications. – 2004. – Vol. 131, № 8. – pp. 499-503. – DOI 10.1016/j.ssc.2004.06.022.

17. Giant Isotope Effect of Thermal Conductivity in Silicon Nanowires / P. Ci, M. Sun, M. Upadhyaya [et al.]. – Text : electronic // Physical Review Letters. – 2022. – Vol. 128, № 8. – DOI 10.1103/PhysRevLett.128.085901.

18. Ultrahigh thermal conductivity of isotopically enriched silicon / A. V. Inyushkin, A. N. Taldenkov, J. W. Ager [et al.]. – Text : electronic // Journal of Applied Physics. – 2018. – Vol. 123, № 9. – DOI 10.1063/1.5017778

19. Kokin A. A. Tverdotel'nye kvantovye komp'yutery na yadernyh spinah/ A.A. Kokin. – Moskva-Izhevsk : Institut komp'yuternyh issledovanij, 2004. – 204 p. – ISBN 5 93972-319-5. – Text : direct.

20. Targeted enrichment of  $^{28}\text{Si}$  thin films for quantum computing / K. Tang, H. S. Kim, A. N. Ramanayaka [et al.]. – Text : electronic // Journal of physics communications. – 2020. – Vol. 4, № 3. – DOI 10.1088/2399-6528/ab7b33.
21. Enriching  $^{28}\text{Si}$  beyond 99.9998% for semiconductor quantum computing / K. J. Dwyer, J. M. Pomeroy, D. S. Simons [et al.]. – Text : electronic // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2014. – Vol. 47, № 34. – DOI 10.1088/0022-3727/47/34/345105.
22. A new generation of 99.999% enriched  $^{28}\text{Si}$  single crystals for the determination of Avogadro's constant / N. V. Abrosimov, D. G. Aref'Ev, P. Becker [et al.]. – Text : electronic // Metrologia. – 2017. – Vol. 54, № 4. – DOI 10.1088/1681-7575/aa7a62.
23. Large-scale production of highly enriched  $^{28}\text{Si}$  for the precise determination of the Avogadro constant / P. Becker, D. Schiel, H. J. Pohl [et al.]. – Text : electronic // Measurement Science and Technology. – 2006. – Vol. 17, № 7. – DOI 10.1088/0957-0233/17/7/025.
24. Curtis N. J.  $^{29}\text{Si}$  Solid-State NMR Analysis of Opal-AG, Opal-AN and Opal CT: Single Pulse Spectroscopy and Spin-Lattice T1 Relaxometry / N. J. Curtis, J. R. Gascooke, M. R. Johnston, A. Pring – Text : electronic // Minerals. – 2022. – Vol. 12, № 3. – DOI 10.3390/min12030323.
25. Morgunov R. B. High-temperature spin dynamics studied by solid-state nuclear resonance and electron paramagnetic resonance in  $^{29}\text{Si}:\text{B}$  crystals / R. B. Morgunov, O. V. Koplak. – Text : electronic // Journal of materials science. – 2016. – Vol. 51. – C. 1838-1844.
26. Schraml J. Improved baseline in  $^{29}\text{Si}$  NMR spectra of water glasses / J. Schraml, P. Sandor, S. Korec, M. Krump, B. Foller. – Text : electronic // Magnetic Resonance in Chemistry. – 2013. – Vol. 51, № 7. – pp. 403-406. – DOI 10.1002/mrc.3961.
27. Goldman J. R. Magnet designs for a crystal-lattice quantum computer / J. R. Goldman, T. D. Ladd, F. Yamaguchi, Y. Yamamoto. – Text : electronic // Applied Physics A. – 2000. – Vol. 71. – pp. 11-17. – DOI 10.1007/PL00021084.

28. Itoh K. M. An all-silicon linear chain NMR quantum computer / K. M. Itoh. – Text : electronic // *Solid State Communications*. – 2005. – Vol. 133, № 11. – pp. 747-752. – DOI 10.1016/j.ssc.2004.12.045.
29. Nejtronno-transmutacionnoe legirovanie fosforom monoizotopa kremniya  $^{30}\text{Si}$  / A. N. Ionov, P. G. Baranov, B. YA. Ber [et al.]. – Text : electronic // *Pis'ma v ZHTF*. – 2006. – Vol. 32, №. 12. – pp. 87-94. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20338591>.
30. Abramovskij V. A. Raspredelenie primesi fosfora  $^{31}\text{P}$  v kristalle kremniya  $^{30}\text{Si}$  po tolshchine obrazca pri nejtronno-transmutacionnom legirovanii / V. A. Abramovskij, N. V. Abramovskaya. – Text : direct // *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. YAroslava Mudrogo*. – 2014. – № 81. – pp. 23-26.
31. Abramovskij V. A. Sovmestnoe nejtronnoe transmutacionnoe legirovanie izotopami fosfora  $^{31}\text{f}$  i sery  $^{32}\text{S}$  izotopa kremniya  $^{30}\text{Si}$  / V. A. Abramovskij, N. V. Abramovskaya. – Text : direct // *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. YAroslava Mudrogo*. – 2013. – Vol. 1, № 75. – pp. 5-6.
32. Neutron transmutation doping of silicon at research reactors / Vienna : International Atomic Energy Agency, 2012. – 109 p. – ISBN 978-92-0-130010-2. – Text : direct.
33. Scientific, engineering and metrological problems in producing pure  $^{28}\text{Si}$  and growing single crystals / Y. V. Tarbeyev, A. K. Kaliteyevsky, V. I. Sergejev [et al.]. – Text : electronic // *Metrologia*. – 1994. – Vol. 31, № 3. – pp. 269-273. – DOI 10.1088/0026-1394/31/3/014.
34. Ryss I.G. Himiya ftora i ego neorganicheskikh soedinenij / I.G. Ryss. – M. : Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo himicheskoy literatury, 1956. – 720 s.
35. Ftor i ego soedineniya / Dzh. H. Sajmons, H. Dzh. Emileus, A.B. Barg [et al.]. – M. : IL 1953. – Vol. 1. – 509 s.
36. Zajcev V. A. Proizvodstvo ftoristyh soedinenij pri pererabotke fosfatnogo syr'ya / V. A. Zajcev, A. A. Novikov, V. I. Rodin. – M. : Himiya, 1982. – 248 c.

37. Orlov A.A. Razdelenie mnogokomponentnoj izotopnoj smesi v processe zapolneniya kaskada gazovyh centrifug / A.A. Orlov, A.A. Ushakov, V.P. Sovach // *Izvestiya vuzov: YAdernaya energetika*. – 2019. – № 3 – pp. 75-87. – DOI 10.26583/npe.2019.3.07.
38. Orlov A.A. Razdelenie mnogokomponentnyh smesej : Uchebnoe Posobie / A.A. Orlov, M.V. Verlinskij : Tomskij politekhnicheskij universitet. – Tomsk : Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2020. – 90 p. – ISBN 978-5-4387-0956-5.
39. Borisevich V.D. Separation of multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge / V.D. Borisevich, E.V. Levin // *Separation science and technology*. – 2001. – Vol. 36, № 8-9. – pp. 1697-1735. – DOI 10.1081/SS-100104759.
40. Izotopy: svojstva, poluchenie, primenenie. V 2 t. T. 2 / V.YU. Baranov, B.M. Andreev, D.G. Aref'ev [et al.] : red. V.YU. Baranov – M. : Fizmatlit, 2005. – T.1. – 600 p. – ISBN 5-9221-0522-1.
41. 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*. – 1995. – Vol. 77, № 4. – pp. 760-767.
42. Palkin V.A. Analiticheskie ocenki sodержaniya izotopov slaboobogashchennogo regenerirovannogo urana v mnogopotochnyh optimal'nyh kaskadah / V.A. Palkin, E.V. Maslyukov // *Atomnaya energiya*. – 2009. – Vol. 107, №.6. – pp. 345–347.
43. Sazykin, A.A. Termodinamicheskij podhod k razdeleniyu izotopov, v kn. *Izotopy: svojstva, poluchenie, primenenie* / A. A. Sazykin // *Izotopy: svojstva, poluchenie, primenenie* : red. V.YU. Baranov. – M. : Atomizdat, 2000. – pp. 72-108.
44. ZHigalovskij B.V. Lekcionnye materialy po mnogokomponentnym smesyam / B.V. ZHigalovskij. – Novoural'sk : UEKHK, 1999. – 57 s.

45. Kucherov R.YA. K teorii kaskadov dlya razdeleniya mnogokomponentnyh izotopnyh smesey / R.YA. Kucherov, V.P. Minenko // Atomnaya energiya. – 1965. – Vol. 19, № 4. – pp. 360-367.
46. De la Garza A. Multicomponent isotope separation in cascades / A. De la Garza, G. A. Garrett, J. E. Murphy. – Text : electronic // Chemical Engineering Science. – 1961. – Vol. 15, № 3-4. – pp. 188-209. – DOI 10.1016/0009-2509(61)85023-9.
47. Sazykin A.A. Razdelenie mnogokomponentnyh smesey izotopov v kvaziideal'nom kaskade s dvumya tochkami pitaniya / A.A. Sazykin // sbornik dokladov IX Vseross. (Mezhdunar.) nauchnoj konferencii «Fiziko-himicheskie processy pri selekcii atomov i molekul». – M. : CNIIAtominform, 2004. – pp. 32-37.
48. Izrailevich A.I. Formuly rascheta sodержaniya minornyh izotopov dlya trekhpotochnykh kaskadov / A.I. Izrailevich // sbornik dokladov VIII Vserossijskoj (Mezhdunarodnoj) nauchnoj konferencii «Fiziko-himicheskie processy pri selekcii atomov i molekul». – M. : CNIIAtominform, 2003. – С. 40-42.
49. Sulaberidze G.A. Kvaziideal'nye kaskady s dopolnitel'nym potokom dlya razdeleniya mnogokomponentnyh izotopnyh smesey / G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich, Se Cyuan'sin' // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii. – 2006. – Vol. 40. № 1. – pp. 7-16.
50. Sulaberidze G.A. Cascades for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures / G.A. Sulaberidze, V.D. Borisevich // Separation science and technology. – 2001. – Vol. 36, № 8-9. – pp. 1769-1817. – DOI 10.1081/SS-100104761.
51. Yamamoto I. Muticomponent Isotope Separating Cascade Composed of Elements with Large Separation Factors / I. Yamamoto, A. Kanagava // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1978. – Vol. 15, № 8. – pp. 580-584.
52. Von Halle E. Multicomponent isotope separation in matched abundance ratio cascades composed of stages with large separation factors / E. Von Halle //



Proc 1st Workshop on Separation Phenomena in Liquids and gases. – Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant, 1987. – Vol. 1, № 2.

53. Palkin, V.A. Raschet i optimizaciya kaskada s neskol'kimi pitaniyami po srezam parcial'nyh potokov / V.A. Palkin // sbornik dokladov XI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Fiziko – himicheskie processy pri selekcii atomov i molekul i v lazernyh, plazmennyh i nanotekhnologiyah». – M. : CNIIAtominform, 2006. – pp. 29-33.

54. Minenko V.P. Predel'noe obogashchenie promezhutochnyh izotopov v otbore s koncov kaskada / V.P. Minenko // Atomnaya energiya. – 1972. – Vol. 33, № 2. – pp. 704-706.

55. Palkin V.A. Optimizaciya kaskadov po kriteriyu maksimuma ispol'zovaniya razdelitel'noj sposobnosti elementov / V.A. Palkin, E.S. Frolov // sbornik dokladov XI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Fiziko – himicheskie processy pri selekcii atomov i molekul i v lazernyh, plazmennyh i nanotekhnologiyah». – M. : CNIIAtominform, 2006. – C. 21-28.

56. Holpanov L.P. Effektivnyj metod rascheta kaskadov dlya razdeleniya mnogokomponentnyh smesej / L.P. Holpanov, D.V. Potapov, G.A. Sulaberidze, V.A. CHuzhinov // Himicheskaya promyshlennost'. – 1998. – № 3. – pp. 44-50.

57. K voprosu o postroenii kaskadov dlya razdeleniya mnogokomponentnyh izotopnyh smesej / N.A. Kolokol'cov, V.P. Minenko, B.I. Nikolaev [et al.]. // Atomnaya energiya. – 1970. – Vol. 29, № 6. – pp. 425-429.

58. Zeng S. Isotopically selective mass transfer in the Q-cascade with losses of working substance / S. Zeng, A.Yu. Smirnov, D. Jiang [et al.]. // Separation Science and Technology. – 2013. – Vol. 48, № 1. – pp. 15-21.

59. Borisevich V. New approach to optimize Q-cascades / V. Borisevich, G. Sulaberidze, S. Zeng // Chemical engineering science. – 2011. – Vol. 66, № 3. – pp. 393-396.

60. Zeng, S. Use of the Q-cascade in calculation and optimization of multi-isotope separation / S. Zeng, D. Jiang, V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze //

Chemical engineering science. – 2011. – Vol. 66, № 13. – pp. 2997-3002. – DOI 10.1016/j.ces.2011.03.056.

61. The Q-cascade explanation / S. Zeng, G.A. Sulaberidze, D. Jiang [et al.]. // Separation Science and Technology. – 2012. – Vol. 47, № 11. – pp. 1591-1595. – DOI 10.1080/01496395.2012.661826.

62. Palkin V.A. Optimal'nyj kaskad s zadannymi koncentraciyami po celevomu izotopu: Svoystva i sravnenie s R-kaskadom / V.A. Palkin, E.S. Frolov // sbornik dokladov VIII Vserossijskoj (Mezhdunarodnoj) konferencii «Fiziko-himicheskie metody pri selekcii atomov i molekul». – M. : CNIIAtominform. – 2003. – С. 23-28.

63. Palkin V. A. Optimal'nyj, ideal'nyj i R-kaskady : svoystva i sravnitel'nye harakteristiki / V.A. Palkin, E.S. Frolov // sbornik dokladov IX Vserossijskoj (Mezhdunarodnoj) konferencii «Fiziko-himicheskie metody pri selekcii atomov i molekul». – M. : CNIIAtominform. – 2004. – С. 32-37.

64. Palkin V.A. Raschet optimal'nyh parametrov kaskada dlya razdeleniya mnogokomponentnyh izotopnyh smesej / V.A. Palkin, N.A. Sbitnev, E.S.Frolov // Atomnaya energiya. – 2002. – Vol. 92, № 2. – pp. 130-133.

65. Finansovyj menedzhment, resursoeffektivnost' i resursosberezhenie : uchebno-metodicheskoe posobie / N.A. Gavrikova, L.R. Tuhvatulina, I.G. Vidyaev [et al.] : Tomskij politekhnicheskij universitet. – Tomsk : NI TPU, 2014. – 73 s.

66. Knyshova, E. N. Ekonomika organizacii : uchebnik / E.N. Knyshova, E.E. Panfilova. – M. : FORUM : INFRA-M, 2023. – 335 p. – (Srednee professional'noe obrazovanie). – ISBN 978-5-8199-0696-5. – Text : electronic. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1911502> (date of the application: 22.05.2023). – Access mode : by subscription.

67. SHul'min V. A. Ekonomicheskoe obosnovanie v diplomnyh proektah: uchebnoe posobie dlya vuzov / V. A. SHul'min, T. S. Usynina. – Staryj Oskol : TNT, 2012. – 192 s.

68. Trudovoj kodeks Rossijskoj Federacii ot 30.12.2001 №197-FZ (red. ot 19.12.2022, s izm. ot 11.04.2023) (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.03.2023) //

Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807664> (date of the application: 21.05.2023).

69. SP 2.4.3648-20 Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k organizaciyam vospitaniya i obucheniya, otdyha i ozdorovleniya detej i molodezhi : utv. Ministerstvom yusticii Rossijskoj Federacii ot 18.12.2020 № 61573 // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/566085656> (date of the application: 21.05.2023).

70. SanPiN 2.2.4.548-96. Fizicheskie faktory proizvodstvennoj sredy. Gigienicheskie trebovaniya k mikroklimatu proizvodstvennyh pomeshchenij : utverzhdeny i vvedeny v dejstvie postanovleniem Goskomsanepidnadzora Rossii ot 1 oktyabrya 1996 g., № 21 // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901704046> (date of the application: 21.05.2023).

71. GOST 12.1.006-84 SSBT. Elektromagnitnye polya radiochastot. Dopustimye urovni na rabochih mestah i trebovaniya k provedeniyu kontrolya. // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200272> (date of the application: 21.05.2023).

72. SanPiN 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya (ot 28 yanvaryaya 2021 g. № 2) // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (date of the application: 21.05.2023).

73. SN 2.2.4/2.1.8.562-96. SHum na rabochih mestah, v pomeshcheniyah zhilyh, obshchestvennyh zdaniy i na territorii zhiloy zastrojki // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901703278> (date of the application: 21.05.2023).

74. GOST 12.1.038-82 SSBT. Elektrobezopasnost'. Predel'no dopustimye znacheniya napryazhenij prikosnoveniya i tokov // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (date of the application: 21.05.2023).

75. GOST 12.1.044-2018 SSBT. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160696> (date of the application: 21.05.2023).
76. GOST 12.1.019-2017 SSBT. Elektrobezopasnost'. Obshchie trebovaniya i nomenklatura vidov zashchity // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200161238> (date of the application: 21.05.2023).
77. NPB 105-95. Opredelenie kategorij pomeshchenij i zdaniy po vzryvopozharnoj i pozharnoj opasnosti // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9051557> (data obrashcheniya: 21.05.2023).