

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»
 ООП/ОПОП Изотопные технологии и материалы
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разделение изотопов бора методом химического изотопного обмена с термическим обращением потоков

УДК 621.039.32:546.27.027

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ11	Сухарь Павел Андреевич		

Руководитель

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

Консультант (руководство ВКР на английском языке)

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Спицына Л.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

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
Separation of boron isotopes by chemical isotope exchange with thermal reversal of flows
UDC <u>621.039.32:546.27.027</u>

Student

Group	Full name	Signature	Date
0AM11	Sukhar Pavel Andreevich		

Scientific supervisor

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

Advisers

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

ADVISERS:

Section «Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving»

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

Section «Social Responsibility»

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

ADMITTED TO DEFENSE:

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
Универсальные	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая 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
Общепрофессиональные	
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
Профессиональные	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объёме 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
Universal competences	
UC(U)-1	Ability to make critical analysis of problem-based situations using the systems analysis approach, and generate decisions and action plans.
UC(U)-2	Ability to run a project at all life-cycle stages.
UC(U)-3	Ability to organize and lead the teamwork and generate a team strategy to achieve the target goal.
UC(U)-4	Ability to use modern communication technologies to realize academic and professional interaction.
UC(U)-5	Ability to analyze and account for cultural diversity in the process of intercultural interaction.
UC(U)-6	Ability to set and pursue individual and professional activity priorities and ways to modify professional activity based on the self-esteem.
General professional competences	
GPC(U)-1	Ability to formulate goals and objectives of the research study, select assessment criteria, identify priorities for solving problems.
GPC(U)-2	Ability to apply modern research methods, evaluate and present the results of the performed research.
GPC(U)-3	Ability to present research outcomes in the form of articles, reports, scientific reports and presentations using computer layout systems and office software packages.
Professional competences	
PC(U)-1	Ability to use fundamental laws in a volume sufficient for independent combination and synthesis of new ideas, creative self-expression
PC(U)-2	Ability to create new methods for calculating modern physical installations and devices, develop methods and advanced technologies
PC(U)-3	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
PC(U)-4	Ability to assess the prospects for the development of the nuclear industry, use its modern achievements and advanced technologies in research work
PC(U)-5	Ability to independently perform experimental and theoretical research to solve scientific and industrial problems using modern instruments for scientific research and mathematical calculation methods
PC(U)-6	Ability to carry out calculation, conceptual and design development of modern physical installations and devices
PC(U)-7	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
PC(U)-8	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
PC(U)-9	Readiness for teaching activities in the main educational programs of higher education and additional professional education (APE)
PC(U)-10	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 «Ядерные физика и технологии»
 ООП/ОПОП Изотопные технологии и материалы
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	Сухарю Павлу Андреевичу

Тема работы:

Разделение изотопов бора методом химического изотопного обмена с термическим обращением потоков	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	от 27.01.2023 № 27-77/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Задание. Литературные источники по основам процесса химического изотопного обмена с термическим обращением потоков, по проектированию колонных аппаратов предназначенных для разделения изотопов. Исходные данные для проектирования колонного аппарата для разделения изотопов бора.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор и анализ литературы. 2. Усовершенствование методик расчета технологических параметров и конструкционных характеристик колонных аппаратов предназначенных для разделения изотопов бора. 3. Верификация описанных методик. 4. Проектирование колонных аппаратов оптимальной конструкции. 5. Экономический расчет. 6. Охрана труда и техника безопасности. 7. Выводы. Заключение.

Перечень графического материала	1. Зависимость изменения сечения поглощения нейтронов различных энергий изотопами бора. 2. Блок-схема технологического расчета колонных аппаратов. 3. Зависимость $N(R+1)$ от R . 4. Материальные потоки в колонне. 5. Блок-схема конструкционного расчета колонных аппаратов для ситчатых тарельчатых контактных устройств. 6. Зависимость коэффициента C_1 от расстояния между тарельчатыми контактными устройствами. 7. Зависимость числа теоретических ступеней разделения, необходимых для достижения заданной концентрации ^{10}B .
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП, к.э.н. Спицына Любовь Юрьевна
Социальная ответственность	Доцент ОЯТЦ ИЯТШ, к.т.н. Передерин Юрий Владимирович

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ11	Сухарь Павел Андреевич		

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
 _____ Vidyaev D.G
 « ____ » _____ 2023

ASSIGNMENT
for the Graduation Thesis completion

In the form:

Master's thesis

For a student:

Group	Full name
0AM11	Sukhar Pavel Andreevich

Topic of research work:

Separation of boron isotopes by chemical isotope exchange with thermal reversal of flows	
Approved by the order of the Director of School of Nuclear Science & Engineering (date, number):	от 27.01.2023 № 27-77/с

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

TECHNICAL TASK:

Initial date for research work:	Task. Literature sources on the basics of the process of chemical isotope exchange with thermal reversal of flows, for the design of column apparatus intended for isotope separation. Initial data for the design of a column apparatus for the separation of boron isotopes.
List of the issues to be investigated, designed and developed	<ol style="list-style-type: none"> 1. Review and analysis of literature 2. Improvement of methods for calculating technological parameters and structural characteristics of column apparatus intended for the separation of boron isotopes. 3. Verification of the described methods. 4. Engineering of column apparatus of optimal design. 5. Economic calculation. 6. Occupational health and safety. 7. Conclusions.
List of graphic material	1. Dependence of the change in the absorption cross section of neutrons of various energies by boron isotopes.

	2. Block diagram of the technological calculation of column apparatus. 3. Dependence $N(R+1)$ on R . 4. Material flows in the column. 5. Block diagram of the structural calculation of column apparatus for sieve disc contact devices. 6. Dependence of the coefficient C_1 on the distance between the disc contact devices 7. Dependence of the number of theoretical separation steps required to achieve a given concentration of ^{10}B .
--	---

Advisors to the sections of the Master Thesis

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.

Date of issuance of the assignment for Master Thesis completion according to the schedule

Assignment issued by a scientific supervisor:

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

Assignment accepted for execution by a student:

Group	Full name	Signature	Date
0AM11	Sukhar Pavel Andreevich		



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
ООП/ОПОП Изотопные технологии и материалы
Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Обучающийся

Группы	ФИО
0AM11	Сухарь Павел Андреевич

Тема работы:

Разделение изотопов бора методом химического изотопного обмена с термическим обращением потоков
--

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	Литературный обзор по теме ВКР.	15
30.04.2023	Совершенствование и описание методик.	25
10.05.2023	Результаты исследований. Обработка результатов.	25
15.05.2023	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. Социальная ответственность.	15
26.05.2023	Оформление работы и презентационных материалов.	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

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

Обучающийся

Группы	ФИО	Подпись	Дата
0AM11	Сухарь Павел Андреевич		

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

CALENDAR RATING PLAN completion of the final qualifying work

Student

Group	Full name
0AM11	Sukhar Pavel Andreevich

Topic of research work:

Separation of boron isotopes by chemical isotope exchange with thermal reversal of flows

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	Literature review on the research topic.	15
30.04.2023	Improvement and description of methods.	25
10.05.2023	Research results. Processing of results.	25
15.05.2023	Financial management, resource efficiency and resource saving. Social responsibility.	15
26.05.2023	Preparation of papers and presentation materials.	10

COMPILED BY:

Scientific supervisor

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

AGREED:

Program Director

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

Student

Group	Full name	Signature	Date
0AM11	Sukhar Pavel Andreevich		

Abstract

This master's thesis consists of: 118 pages, 29 tables, 10 figures, 104 literature references.

Key words: chemical isotope exchange, thermal reversal of flows, column apparatus, calculation methods, isotopes.

The object of study are column apparatuses of various capacities with sieve plates designed for the separation of boron isotopes by the method of chemical isotope exchange with thermal reversal of flows in the system of boron trifluoride and its molecular complex compound with anisole.

The purpose of this work is to improve the existing methods for calculating the technological parameters of the rectification process and the structural characteristics of column apparatuses, their verification and use in the design of column apparatuses of optimal design intended for the separation of boron isotopes by the method of chemical isotope exchange with thermal reversal of flows.

In the course of the study, improvement of methods for calculating the technological parameters of the rectification process and the structural characteristics of column apparatus, allowing more accurate analytical determination of the operating reflux ratio and the number of separation stages, which leads to the abandonment of the use of graphical methods and the addition of empirical corrections to the number of stages in further calculations, reducing the time of calculations. Improved calculation methods are implemented using a block approach for describing algorithms in a software environment PTC MathCad Prime, that allows you to quickly upgrade each block of the algorithm.

The calculation methods are verified for the classical benzene-toluene system used in the oil industry, as well as for the boron trifluoride-anisole system. A good convergence of the calculation results with the literature data is shown, which makes it possible to consider the calculation method as universal. Verification of the structural calculation method for the separation of boron isotopes has not been carried out due to the lack of data on the characteristics of the contact devices of industrial column apparatuses in the literature.

The optimal technological parameters and design characteristics of column apparatuses designed for the production of 2 and 4 tons of boron per year with an enrichment of 96 weight. % over ^{10}B . It is shown that column apparatuses with different capacities have the same type of sieve plates. At the same time, they have a diameter and height of column apparatuses that have strict design requirements for plates.

The results obtained can be used to implement an industrial plant for the separation of boron isotopes in JSC «Siberian Chemical Plant».

Table of contents

Introduction	15
1 Boron isotopes: main properties, applications and separation methods	16
1.1 Basic properties of boron isotopes	16
1.2 Boron isotope applications	19
1.3 Boron isotope separation methods	25
1.3.1 Separation of boron isotopes by rectification	26
1.3.2 Separation of boron isotopes by chemical isotope exchange	28
1.3.3 Gas-centrifuge separation of boron isotopes	33
2 Method for calculating column	36
2.1 Object of study	36
2.2 Formulation of the purpose	36
2.3 Algorithm for technological calculation of column apparatus	38
2.4 Algorithm for structural calculation of column apparatus	49
2.5 Verification of calculation methods	59
3 Calculation of the column apparatus for the separation of boron isotopes	62
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	69
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований	69
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	69
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	71
4.1.3 SWOT-анализ	73
4.2. Инициация проекта	76
4.3. Планирование управления научно-техническим проектом	78
4.3.1. Иерархическая структура работ проекта	78
4.3.2. Контрольные события проекта	79
4.3.3 Определение трудоемкости выполнения работ	79
4.3.4 Разработка графика проведения научного исследования	80

4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	83
4.4.1 Расчет материальных затрат	83
4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ	84
4.4.3 Затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования.....	85
4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды.....	87
4.4.5 Накладные расходы	88
4.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	88
4.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	89
4.5.1 Определение финансовой и ресурсной эффективности	89
4.6 Выводы по разделу.....	93
5 Социальная ответственность	95
5.1 Выявление и анализ опасных и вредных производственных факторов..	95
5.1.1 Микроклимат	96
5.1.2 Шум и вибрация.....	97
5.1.3 Освещенность.....	98
5.1.4 Электробезопасность.....	99
5.1.5 Электромагнитные поля.....	101
5.1.6 Пожарная и взрывная безопасность.....	102
5.2 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях.....	104
5.3 Выводы по разделу «Социальная ответственность».....	106
Conclusions	107
References	108

Introduction

The development of the modern nuclear industry requires the creation of highly efficient and competitive facilities for the production of highly pure substances and highly enriched isotope products. One of the promising directions is the work on obtaining boron and its compounds with a changed isotopic composition by the method of chemical isotope exchange with thermal reversal of flows.

Currently, there is an increase in the consumption of isotopically enriched boron-containing materials and products with a relative concentration of ^{10}B of more than 92 weight % used in the nuclear and chemical industries, medicine, instrumentation. Thus, work on the creation of an efficient and economical industrial technology for the separation of boron isotopes is relevant.

In this regard, the purpose of this work was to improve the existing methods for calculating the technological parameters of the rectification process and the structural characteristics of column apparatuses, their verification and use in the design of column apparatuses of optimal design intended for the separation of boron isotopes by the method of chemical isotope exchange with thermal reversal of flows.

To achieve this purpose, the following objectives are formulated:

1. conducting a literature review on the topic;
2. improvement and verification of methods for calculating technological parameters and structural characteristics of column apparatus;
3. engineering column apparatus of optimal design, intended for the production of 2 and 4 tons of boron per year with an enrichment of 96 weight % by ^{10}B .

1 Boron isotopes: main properties, applications and separation methods

1.1 Basic properties of boron isotopes

Boron, as a chemical element, has 14 isotopes, among which only two nuclides, ^{10}B and ^{11}B , are stable [1, 2]. The natural concentration of boron isotopes was first established in 1920 by F.B. Aston using a mass spectrometer designed by him [3, 4]. This result of the analysis was repeatedly verified by other researchers using other methods and boron-containing compounds (Table 1.1) [3].

Table 1.1 – Concentration of natural boron isotopes

Compound	Concentration, weight %		Analysis method	Literature source
	^{10}B	^{11}B		
BF_3	19.80	80.20	Mass spectrometry	[4, 5, 6, 7, 8]
BF_3	21.60	78.40	Spectrophotometric	[5, 6, 9]
BF_3	20.50	79.50	Mass spectrometry	[6, 9]
BF_3	19.50	80.50	Mass spectrometry	[6]
BCl_3	19.58	80.42	Mass spectrometry	[5, 6, 10]
BCl_3	19.60	80.40	Mass spectrometry	[11]
B_2O_3	19.36	80.64	Mass spectrometry	[6, 12]
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	18.36	81.64	Mass spectrometry	[13]
H_3BO_3	19.82	80.18	Mass spectrometry	[14]

Table 1.1 shows the discrepancy between the data obtained by various researchers, due to the accuracy of the methods of analysis used, without taking into account the separation of boron isotopes in the processes of chemical preparation of initial samples. Another reason for the variation in the natural concentration of boron isotopes is related to the geochemical processes of mineral formation in various deposits [3].

In accordance with the data of IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) [14], the average natural concentration of boron isotopes for various deposits, according to the best measurements, is 19.82 weight % and 80.18 weight %, respectively.

The concentration of boron isotopes in their natural mixture is an important initial value for calculating any process of their separation. In particular, it determines the volume of raw materials and other material flows processed in separation plants, the size and duration of the start-up period of these plants, as well as the level of energy consumption during their operation [3].

Table 1.2 presents the main nuclear and magnetic properties of boron isotopes.

Table 1.2 – Nuclear and magnetic properties of boron isotopes [1]

Characteristic	Isotop	
	¹⁰ B	¹¹ B
Atomic mass, a.m.u.	10.01293704	11.00930544
Nuclear spin	3 ⁺	3/2 ⁻
Magnetic moment, magneton	+1.80064486	+2.68864891
Quadrupole moment, barn	0.0847256	0.0407

An important feature of boron isotopes is the difference in the degree of absorption of neutrons in a wide energy range (Figure 1.1). It can be seen from the figure that ¹⁰B is characterized by a high, and ¹¹B by an extremely low effective capture cross section for thermal and fast neutrons [15].

Materials based on the ¹⁰B isotope are nonresonant neutron absorbers, for which the absorption cross section varies inversely with the neutron velocity over the entire energy range [15].

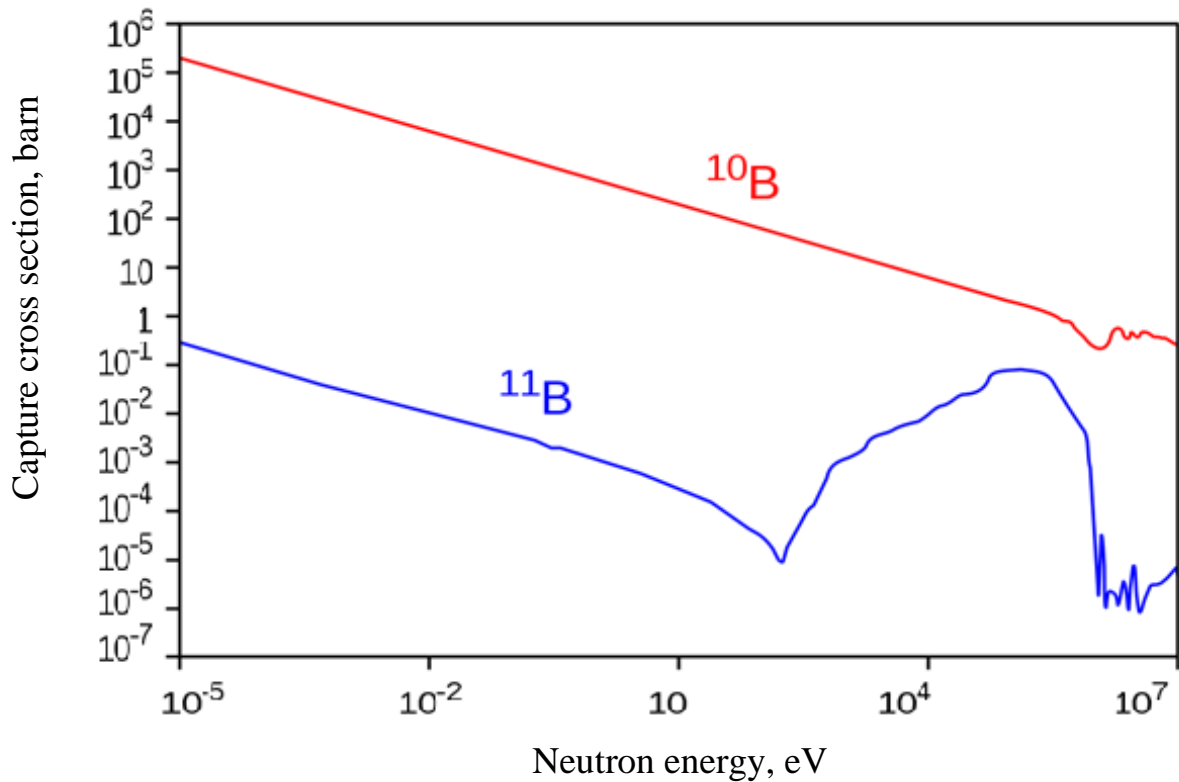
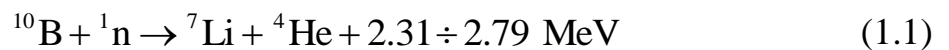


Figure 1.1 – Dependence of the change in the absorption cross section of neutrons of various energies by boron isotopes

Absorbing materials based on the ^{10}B isotope are characterized by the absorption of thermal neutrons according to the reaction (n, α) [3, 15]:



Reaction (1.1) is accompanied by the formation of a large amount of gaseous helium in the absorber and the release of heat (in 94% – 2.31 MeV + γ -radiation 0.478 MeV; in 6% – 2.79 MeV), which limits (reduces) the radiation resistance of the material. The resulting ^7Li nuclei have a high capture cross section for fast neutrons [3].

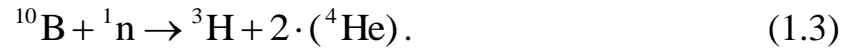
The interaction between the ^{10}B isotope can also proceed according to the reaction:



The absorption cross section of reaction (1.2) is 0.5 barn, and the energy of γ -radiation can vary in the range from 4.47-11.43 MeV [3, 16]. Thus, unlike other

neutron absorbers, when interacting with neutrons, boron does not produce hard γ -radiation, which is due to the small cross section of reaction (1.2) [3].

For neutrons with energies above 1 MeV, absorption can occur by reaction with the formation of radioactive tritium [15, 17, 18]:



Tritium is a β -emitter, due to its radiochemical properties, it easily dissolves in a liquid, enters the human body, replacing hydrogen and causing damage to health [18]. The cross sections for reaction (1.3) for neutrons with energies from 3 to 8 MeV are in the range from 0.025 to 0.225 barn. These data are used to estimate the amount of generated tritium when absorbing materials based on the ^{10}B isotope are used [18–24].

^{11}B and materials based on it, unlike ^{10}B , have the property of “transparency” in relation to neutrons, the absorption cross sections of neutrons of various energies do not exceed 1 barn (Figure 1.1) [3].

1.2 Boron isotope applications

The unique nuclear properties of boron isotopes are the main reason for their wide practical application. Materials based on ^{10}B are in demand in reactor building, radiation chemistry, medicine, instrumentation, biological neutron shielding, where the features of the interaction of ^{10}B with neutrons (reactions (1.1)-(1.3)) are used. Working substances based on ^{11}B are used as a neutron-transparent material in electronics and reactor construction. Both isotopes can be used for the production of ^{11}C and ^{13}N radioisotopes [3, 15, 25, 26].

In reactor construction, ^{10}B with an enrichment of 60 weight % and above (up to 92-96 weight %) is considered the most promising and uncontested material for rods that regulate the rate of nuclear processes occurring in nuclear reactors, where boron is used in three modifications: in combination with carbon – boron carbide, in metal matrices – boron steels and alloys, as well as in the form of boric acid [3, 15].

The advantages of ^{10}B as a neutron absorber make it possible to use it as the basis for anti-activation coatings that prevent neutron activation of structural materials used in nuclear physics experiments and reactor building [3].

Boron carbide with various contents of ^{10}B is the world leader in the use of neutron absorbers containing boron. This is due to a number of factors: its high chemical stability and high melting point, low physical density, and high nuclear concentration ^{10}B , which, depending on the enrichment, can vary over a wide range, up to 10^{23} nuclei/cm³ [15].

The uniqueness of boron carbide also lies in the simultaneous content in it of the ^{10}B isotope with a large absorption cross section for thermal and fast neutrons, as well as carbon and ^{11}B nuclei, which effectively slow down fast neutrons. As a result, boron carbide is a mixture of absorbing and moderating nuclei, which makes it possible to effectively use it in fast neutron nuclear reactors. According to [15], the production of control rods BN-600 and BN-800 annually requires from 10 to 50 kg of enriched ^{10}B , and the projected BN-1200 will require another 200 kg.

The disadvantages of boron carbide, like all materials based on ^{10}B , include their limited radiation resistance due to the formation of a large amount of the gaseous product of the neutron absorption reaction, helium (reaction (1.1)). This is the main reason for the “swelling” of products and their destruction. The disadvantages also include the limited compatibility of boron carbide at high temperature with austenitic grade steels, from which protective shells of regulatory bodies are made. Despite these rather serious shortcomings from a practical point of view, boron carbide remains one of the most widely used absorbent materials due to the uniqueness of its nuclear, physicochemical, technological properties and low cost.

Absorbing materials based on silicon doped with ^{10}B may become promising. Silicon has good physical, mechanical and thermophysical properties (high hardness, strength, temperature, corrosion and radiation resistance) and is easily alloyed with many elements (B, In, Ga, Li, As, Mn, Ca, Ag) in the process of growing. Absorbing materials based on silicon and boron eliminate the main

drawback of all materials based on ^{10}B , i.e., low radiation resistance, while the neutron absorption cross section is 760 barn [27].

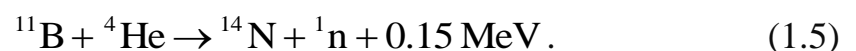
Boron steels have found wide application in the regulatory bodies of nuclear reactors. The mass content of boron in them for technological reasons is limited and does not exceed 2-3%. Boron steels are distinguished by high corrosion resistance in a water coolant. They are characterized by increased brittleness and therefore cannot be used simultaneously as absorbing and structural elements in the control elements of nuclear reactors. As a rule, in structures with elements made of boron steels, special covers are provided to ensure their movement in the core without large mechanical loads, which greatly complicates the design of control elements [3, 27].

The disadvantages of boron steels include the relatively low efficiency of neutron absorption due to the low content of ^{10}B . In addition, the technology for manufacturing products from boron steels, which have almost zero ductility at room temperature, is rather complicated. Nevertheless, control elements made of boron steels are widely used in modern nuclear reactors.

Products made of boron steel are also used as neutron shielding during storage and transportation of fuel assemblies spent in nuclear reactors, as well as in biological shields [15, 27, 28, 29].

In many nuclear centers, work is underway to create new, more efficient neutron-absorbing materials and to improve the design of nuclear reactor control elements - control rods and burnable poisons. Some of these studies are aimed at combining regulatory functions with other functions (production of radioactive isotopes, increasing radiation resistance, reducing induced radioactivity, creating neutron “traps”) [30].

Of particular importance is the practical use of reactions of interaction of boron isotopes with α -particles, accompanied by the formation of neutrons according to the reactions [3, 25]:



These reactions are used to obtain laboratory neutron sources (for example, polonium), as well as to analyze boron-containing rocks [3, 25].

^{10}B with enrichment up to 30 weight % is used as "burnable" absorbers of thermal neutrons, added in the form of boric acid to the water that cools the reactor core. Such additives make it possible to control the rate of nuclear processes in the reactor at the beginning of its operation, when an excess of reactivity is formed, as well as the content of ^{10}B in the core, depending on the depth of "burn-out" of the control rods. The use of boric acid enriched in ^{10}B makes it possible to reduce its concentration, thereby slowing down the corrosion of materials in the reactor core [3, 25, 31, 32].

The use of "burnable" absorbers with an increased concentration of ^{10}B makes it possible to reduce the amount of additives introduced, which prevents the deterioration of the mechanical properties of materials, and also significantly improves the operating conditions of fuel elements and helps to reduce the number of control rods in the reactor core [3].

Of particular interest for reactor construction is ^{10}B used as components of protective materials, since it allows, with their low specific gravity, to provide highly effective (exceeding a hundred times concrete) neutron protection [3, 25, 31]. This circumstance is of particular importance for small-sized low-power reactors [3]. Along with neutron shielding, ^{10}B -based materials solve the problem of biological protection against γ -radiation. When a ^{10}B neutron is absorbed (reaction (1.1)) soft γ -radiation with an energy of 0.478 MeV is emitted, and due to this, the neutron activation of other structural materials decreases [3, 25].

In radiation chemistry, the high ionizing ability of the fragments formed as a result of reaction (1.1) is used, which accelerate radiation-chemical processes. The use of enriched ^{10}B makes it possible to achieve the formation of ionizing particles in the entire volume of the reaction medium, which cannot be achieved with surface irradiation, due to the intense absorption of ionizing particles by the upper layers of the reactants. It was noted in [3, 25, 33] that the volumetric introduction of ^{10}B into

the reaction mixture contributes to a decrease in the reaction products of radioactive impurities arising due to the neutron activation of the irradiated substances.

Surface irradiation of materials with reaction products (1.1) has also found wide practical application in radiation chemistry. An example of such use is the original method proposed for cross-linking (welding) polymeric materials to each other due to the formation of polymer bonds between them under the influence of localized neutron radiation on a solution wetting the surfaces to be stitched, which includes ^{10}B . The method is based on the formation of polymer bonds between the surfaces to be stitched due to short-term heating (up to 1000°C) due to interaction with ionizing particles. Seams formed in this way can withstand a load of more than 100 kg/cm^2 [3, 34, 35].

The phenomenon of neutron flux transformation into heavy ionizing particles underlies the treatment of malignant tumors in nuclear medicine by boron neutron capture therapy (BNCT) [3, 36].

BNCT is a promising technique for the destruction of malignant tumor cells by accumulating ^{10}B in them and subsequent irradiation with neutrons. As a result of the absorption of a neutron by boron, a nuclear reaction occurs with a large release of energy in the cell, which leads to its death. The main ideas of BNCT were formulated by the American radiologist G.L. Locher in 1936 [37], shortly after the discovery of the neutron in 1932 by James Chadwick [38]. The resulting heavy particles have a total range of 10-14 microns, which is commensurate with the diameter of one cell. Therefore, with the predominant localization of ^{10}B in tumor cells, there is a fundamental possibility of their selective damage. The chemical properties of boron make it possible to synthesize many of its derivatives, which expands the boundaries of the search for compounds suitable for BNCT [3, 36].

The key problem in the development of BNCT is to ensure the selective transport of ^{10}B to tumor cells. It is a special case of a medical problem – the delivery of medicinal agents to organs and target tissues [3, 36].

The phenomenon of neutron flux transformation into heavy ionizing particles due to reaction (1.1) is also widely used in instrumentation to create semiconductor

neutron sensors and highly efficient neutron gas-discharge or scintillation counters, which are widely used not only in nuclear physics experiments and in the study of the structure of cosmic radiation, but also in the search for minerals, as well as in the organization of control over the level of neutron radiation [3, 25, 27].

A many times smaller neutron captures cross section for ^{11}B compared to ^{10}B is used in reactor construction to create heat-resistant and “transparent” structural materials with respect to neutrons: borides of zirconium, yttrium, titanium and their alloys [3, 15].

Boron carbide enriched with ^{11}B and crystalline ^{11}B are excellent neutron reflectors, moreover, they have the property of incombustibility and nontoxicity [3].

The presence of a nuclear moment in ^{11}B is used in the chemistry of labeled atoms, in nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy, and in laboratory polonium neutron sources [3, 25].

The neutron transparency and high heat resistance of structural materials based on ^{11}B may in the future be of considerable interest in the development of individual components of the primary circuit of thermonuclear reactors [3, 26].

The considered directions of using isotopically enriched boron-containing materials and products, as well as the possibility of their potentially wide application in fast neutron reactors and in thermonuclear reactor construction, make it possible to predict a significant increase in demand for boron isotopes.

In the late 80s, due to the collapse of the USSR, the domestic nuclear industry lost its only production of highly enriched boron isotopes - the Research Institute of Stable Isotopes (since 1991 it has been reorganized into the National Center for High Technologies of Georgia), Tbilisi, Georgia. All boron used in industry is imported. Solving the problem of the emerging import dependence on the supply of boron isotopes and their growing need for the domestic industry requires urgent measures to be taken to organize such enrichment production in the Russian Federation [3].

According to estimates [15], for the stable development of the nuclear industry, about 2000 kg of ^{10}B with a relative concentration of 92-96 weight % is needed annually. Achieving the required supply volumes and solving the problems

of reducing production costs and improving quality create favorable conditions for conducting new research and make the problem of producing enriched boron isotopes very urgent.

1.3 Boron isotope separation methods

To obtain isotopes of light elements, including isotopes of boron, separation methods based on the physicochemical process of isotope exchange in two-phase systems are widely used historically: rectification or chemical isotope exchange [3, 39-59]. The advantages of these methods are associated with the reversibility of a single act of separation, the simplicity of multiplying a single isotope effect through the use of countercurrent separation columns. All energy consumption in these separation methods is associated with the movement of phases and with the processes of phase flow reversal in the flow reversal nodes. All these advantages make it possible to create high-performance and economical industrial facilities for the separation of isotopes of light elements [39].

Recently, a highly economical and energy-efficient gas centrifuge method, which was originally developed for the separation of uranium isotopes, has been used to separate 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, light isotopes are concentrated relatively closer to the rotor axis, heavier isotopes are concentrated near the rotor wall, due to which a separation effect is achieved. Multiplication of the separation effect to the required level is achieved by connecting gas centrifuges in a cascade [48, 60-62].

Next, we will consider known methods for the separation of boron isotopes and pilot and industrial facilities implemented on their basis in order to identify the most promising and competitive method that provides the most economical industrial production of boron isotopes in the required quantities. Particular attention will be paid to ongoing R&D to modernize and study the operating modes of separation plants and analyze their advantages and disadvantages identified during operation.

1.3.1 Separation of boron isotopes by rectification

In world practice, one of the simplest and most productive methods for separating boron isotopes is rectification. Boron halides are mainly used for distillation of boron compounds. In the series of boron halides, the value of α decreases from fluorine to iodine, and their price increases in the same direction, and therefore, work on the separation of boron isotopes was limited to the use of boron trichloride (BCl_3) and trifluoride (BF_3) [3, 40, 41, 44, 46].

1.3.1.1 Rectification of boron halides

The method of low-temperature rectification of boron trifluoride (BF_3) was developed in the early 1960s. Scientific research and development work (R&D) was carried out in the USSR and England [3, 40-47].

Boron trifluoride has a boiling point of 171.5 K and a critical temperature of 260.9 K. In this temperature range, according to the results of [3, 40, 44, 45], $^{11}\text{BF}_3$ is more volatile, while the separation factor $\alpha = 1.002\text{--}1.011$ [3, 40, 44].

The accumulation of heavy ^{11}B in the upper part of the column apparatus occurs due to the specific properties of boron isotopes. In the separation of isotopes of other light elements, no such “inversion” was found [3, 39, 41, 44].

In 1965, a plant for the separation of boron isotopes by low-temperature rectification BF_3 was built in the USSR, including a column 57 mm in diameter, filled to a height of 49.5 m with a wire spiral prismatic packing 2.6×2.7 mm in size and operating at atmospheric pressure. The annual productivity of the plant is 20-25 kg ^{10}B with a concentration of 85 weight % [44, 46].

To increase the efficiency of the installation, R&D was carried out on the rectification of BF_3 at elevated pressure [41]. The results showed that with an increase in pressure with a decrease in the separation factor, the height of the equivalent theoretical stage (HETS) decreases, which is explained by the directly proportional dependence of the packing capacity on pressure. At the same time, it

was found that the operation of the installation under increased pressure (3–5 at.) proceeds more stably [41, 46].

In the period from 1960-1970 rectification of BF_3 was one of the main industrial methods for the production of enriched ^{10}B and ^{11}B , however, in the early 1970-s, the method was recognized as unpromising due to the extremely low separation factor, relatively more complex instrumentation, utilization of BF_3 streams depleted in the target isotope, and high consumption of refrigerant to maintain a low temperature [3, 44, 46].

The choice of BF_3 as a feedstock is due not only to the thermodynamic stability of this compound, lower cost and corrosion activity compared to other boron halides, but also to the production of BF_3 developed in Russia at JSC “Halogen” (Perm) and the ability to work with a simple binary (due to the monoisotopicity of fluorine) isotopic mixture. The low molecular weight of BF_3 contributes to its high rate of diffusion in the gas (vapor) and liquid phases, which ensures a high rate of interfacial isotope exchange in working systems containing this compound [3, 56].

In modern industry, low-temperature rectification of BF_3 plays an important role in the implementation of processes for the production of boron isotopes by chemical isotope exchange (CIE), where it is used for preliminary deep purification of the initial BF_3 feed stream [3, 44].

For the first time, the separation of boron isotopes by distillation of another boron halide, BCl_3 , was proposed by G.K. Urey in 1935 in [49]. Boron trichloride has a normal boiling point of 285.9 K. In the temperature range of 278–438 K, according to the results of [3, 41, 50, 51], $^{11}\text{BCl}_3$ is more volatile, and the separation factor $\alpha = 1.0018\text{--}1.0043$.

The first installation for the separation of boron isotopes by BCl_3 rectification was a laboratory glass column 160 cm high and 20 mm in diameter, filled with a 1.6×1.6 mm Dixon packing with 192 theoretical stages. Enrichment in ^{10}B by a factor of 1.35 was obtained on this column [3, 40].

The process of BCl_3 rectification, despite the relatively simpler technological design than for BF_3 , associated with the possibility of carrying out the separation process at room temperature and atmospheric (or somewhat elevated) pressure, has not been brought to industrial use. This was largely facilitated by the fact that the process of BCl_3 rectification is characterized by a relatively low separation factor, as well as the extremely high corrosivity of BCl_3 [3, 41].

In 2010, JSC “Siberian Chemical Plant” [53] attempted to design, manufacture, and test a new pilot plant for separating boron isotopes by the BCl_3 rectification method. A number of new technical solutions have been implemented in the design of the plant, which make it possible to carry out the technological process of ^{10}B concentration remotely and automatically. The installation consisted of two distillation columns with a total packed bed height of 22 m. A spiral prismatic packing with an element size of $2.5 \times 2.5 \times 0.2$ mm was used as a contact device.

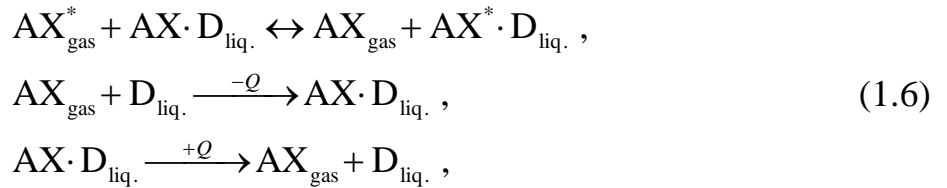
The developed installation passed successful tests that lasted 20 days, as a result of which the concentration of the ^{10}B isotope was more than 40 weight % and, for the first time in modern Russian history, an experimental batch of ^{10}B was produced, and the necessary experimental data were obtained to develop the initial data to determine the investment costs for the creation of experimental - industrial installation with a capacity of 1000 kg of ^{10}B per year with a concentration of 75 weight %. Unfortunately, this facility has not yet been put into commercial operation [53].

1.3.2 Separation of boron isotopes by chemical isotope exchange

Chemical isotope exchange, as compared with the rectification method, is usually characterized by higher values of the separation factor [3, 39]. Unfortunately, this advantage often results in the need to use chemical phase flow reversal, as is the case, in particular, in the separation of hydrogen isotopes in the water–hydrogen system and nitrogen by nitric acid or ammonia methods [39, 44].

This drawback can be eliminated by chemical exchange with a thermal (reagentless) method of phase flow reversal, an example of which is the industrial

processes of separating boron isotopes between gaseous boron trifluoride and a molecular complex formed due to its special electronic structure with such compounds as methylphenyl ($C_6H_5OCH_3$) or demethyl ethers (C_2H_6O) [3, 54, 55, 56]. Thermal reversal of flows simplifies the hardware design of the separation process, bringing it as close as possible to distillation plants [3]. The mechanism of the processes of isotopic exchange and flow reversal (formation of a molecular complex, its thermal dissociation) in this case can be written in general as:



where A – is a part of a molecule of a substance that does not contain an exchanging atom; AX – working substance molecule; X and X* are isotopes involved in the exchange; X* – target isotope; D – is a molecule of a compound that forms a molecular complex of AX-D with AX; -Q and +Q - heat removal and supply, respectively.

The resulting molecular complex compounds do not have a constant boiling point - when heated, they begin to dissociate, releasing BF_3 into the gas phase. The composition of the complex at different temperatures is determined by the molar ratio [3, 56]:

$$r = \frac{\text{mole } BF_3}{\text{mole complexing agent}} ,
 \tag{1.7}$$

Depending on the properties of the complexing agent used, two groups of chemical isotope exchange processes are distinguished: with complete or partial dissociation of complex compounds [3].

Liquid complex compounds BF_3 with simple, complex and cyclic ethers, as well as methyl fluoride, in which the vapor pressure is less than the vapor pressure of the complexing agent. In the vapor phase, they are only partially dissociated, due to which BF_3 cannot be completely separated from the complexing agent, as a result of which two parallel processes of interfacial exchange occur in the countercurrent

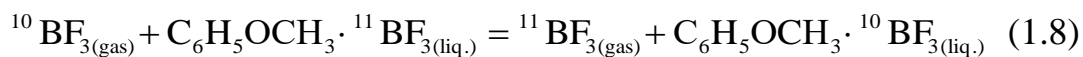
column. One of them is due to the chemical isotope exchange between the liquid complex and the gas formed during its dissociation, and the other is due to the phase isotope exchange between the complex in the liquid and vapor phases. This group of complex compounds is used to separate boron isotopes by chemical exchange rectification [3, 41, 44, 56].

The main advantage of the method of chemical exchange rectification is the possibility of using a wide range of complexing agents with different degrees of dissociation of the complex to organize the technological process. The most promising are the processes of chemical exchange rectification $(\text{CH}_3)_2\text{O}\cdot\text{BF}_3$ and $\text{CH}_3\text{F}\cdot\text{BF}_3$ [3, 41].

In the 1970-s chemical exchange rectification of the BF_3 complex with dimethyl ether was the main method for the production of ^{10}B in the USSR and the USA [41], but it lost its leading position with the discovery and development of the method of chemical isotope exchange separation with complete dissociation of complexes [3, 41].

The chemical isotope exchange between BF_3 and its fully dissociable liquid complex compounds is characterized by the largest separation factors known for the separation of boron isotopes. Methylphenyl ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OCH}_3$) ether, anisole, was chosen as a complexing agent for the industrial separation of boron isotopes in the USSR (Research Institute of Stable Isotopes, Tbilisi, Georgia) [3].

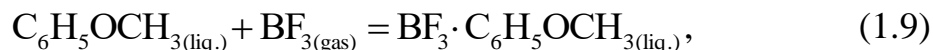
The method of chemical isotopic exchange between BF_3 in the gas phase and its thermally unstable complex with anisole in liquid is based on the reaction [3, 54, 56, 57]:



The used complex of BF_3 with anisole has a low heat of formation, which provides a low level of energy consumption for the circulation of flows in columns, a large value of α , and a high rate of interfacial isotope exchange with a significant content of BF_3 in the complex. Anisol is produced in Russia on an industrial scale at

JSC “Aromasintez” (Kaluga). Among other complexing agents used with BF_3 , anisole is characterized by higher chemical and thermal stability.

Thermal reversal of flows is organized at the ends of countercurrent mass transfer columns, at the top in the absorber according to the reaction [3, 54, 56]:



at the bottom in the desorber according to the reaction:

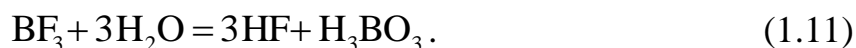


These reactions are characterized by mobile chemical equilibrium. The formation of a liquid complex of BF_3 with anisole (1.9) occurs with the release of heat (51.53 kJ/mol), to remove which a cooling jacket is used in the design of the absorber, since as the temperature rises, the chemical equilibrium shifts towards the starting reagents and the complex compound dissociates into BF_3 and anisole (1.10) [3, 56].

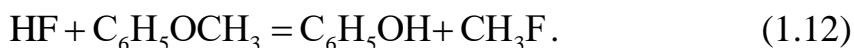
Control of the complete reversal flows of the BF_3 and anisole streams is necessary to prevent leakage of BF_3 to the atmosphere. The temperature of the complex entering the column is controlled by the flow rate of cooling water depending on the readings of a thermocouple located in the absorber [3, 54, 56].

The column-type desorber is intended not only for the dissociation of the complex, but also for the separation of BF_3 vapor from anisole. The desorber is equipped with a stepped electric heater for complete decomposition of the complex [56].

The initial BF_3 and anisole must be carefully cleaned and dried beforehand, since industrially produced anisole, in accordance with [3, 56], can contain up to 0.1 weight % water, as well as phenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$), creosol as by-products. Together with the initial BF_3 , hydrofluoric (HF) and boric (H_3BO_3) acids enter the column apparatus, which are formed as a result of the interaction of BF_3 with water (hydrolysis) and the atmosphere:

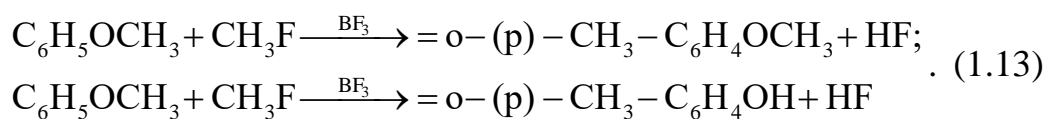


The presence of HF in a two-phase system of BF₃ with anisole leads to the appearance of a side reaction:



As a result of reaction (1.12), phenol is formed as a contaminant in anisole. Reactions (1.11) and (1.12) proceed especially intensively at elevated temperatures in the lower node of flow reversal, the desorber [41, 54, 56].

BF₃ and HF are strong catalysts in the alkylation of aromatic compounds; therefore, the reactions proceed efficiently in the desorber:



The resulting phenol and reaction products (1.13) effectively enter into complex formation with BF₃, however, such complexes are 3–5 times more viscous than those of the complex of BF₃ and anisole, are more stable, and do not completely dissociate at the boiling temperature of anisole in the lower flow reversal node. The undissociated complexes are removed from the desorber together with the reusable anisole flow, which leads to losses of the target ¹⁰B isotope [3, 41, 54, 56, 60].

Parasitic reactions (1.11)–(1.13) lead to incomplete circulation of flows, as a result of which the specified concentration of the target isotope is not achieved. More viscous complexes lead to a deterioration in the hydrodynamic and mass transfer characteristics of the setup [56].

Anisole, like a number of other organic complexing agents, is also capable of autocatalytically decomposing to form phenol. The parasitic reactions of the formation of complex compounds and the decomposition of anisole during the implementation of the “anisole” process of separating boron isotopes require not only special measures for the deep chemical purification of the original BF₃ (by the method of low-temperature rectification), but also measures for the deep drying of anisole, as well as its deep purification from chemical decomposition products. The formation and accumulation of phenol in anisole requires the organization of analytical control of its content in anisole. These measures complicate the

instrumentation of the “anisole” process of separation of boron isotopes, in comparison with the process of rectification of BF_3 [3, 54, 55, 56, 58, 60].

In chemical exchange separation processes, the mechanism of interfacial isotope exchange is complicated by diffusion. This leads to a decrease in the rate of interfacial isotope exchange compared to the rate of a similar process in distillation systems. In turn, the rate of these processes, as well as the value of α , is significantly affected by temperature. Its increase accelerates the interfacial isotope exchange, but reduces α . In this regard, for each working system there is an optimal temperature value at which the highest degree of isotope separation is achieved in a particular process. In the case of the “anisole” process of separation of boron isotopes, the optimum temperature is 313 K, while $\alpha = 1.027$ and the optimum pressure is 0.1 MPa [3, 54, 56].

1.3.3 Gas-centrifuge separation of boron isotopes

Gas-centrifuge separation is one of the highly efficient industrial kinetic methods for isotope separation. The centrifuge technology is easily scalable, allows obtaining high separation characteristics and does not require significant constant energy consumption for phase transformations and temperature control. In separating gas centrifuges, as a rule, a countercurrent flow of the gas mixture is used, the means of organizing which (sampler-circulator, diaphragms with holes, water cooling, etc.) not only complicate the design and reduce the reliability of the centrifuge, but also limit the allowable flows of feed, selection and dump. For these reasons, the disadvantages of this method are traditionally considered to be the complexity of the process equipment, the relatively large number of centrifuges in the cascade, and the high cost of the product with small production volumes [49, 61, 62, 63].

Of greatest interest are subcritical centrifuges optimized for industrial enrichment at ^{10}B and not containing auxiliary elements that complicate the design. The maximum separation factor of such devices is limited by the practically achievable primary equilibrium factor of 1.05–1.07 for boron isotopes. There is no

countercurrent flow in them, therefore, the exact location of the sampling points, strict control of the temperature distribution on the rotor walls with the help of the cooling system is not required [62, 63].

A method is known for obtaining enriched isotope production of boron isotopes by the gas centrifuge method using BF_3 as a working gas. Natural BF_3 is fed into a cascade of gas centrifuges where boron isotope separation takes place. From the first stage of the cascade, a heavy fraction stream enriched in the ^{11}B isotope is taken. From the last stage of the cascade, a light fraction stream enriched in the ^{10}B isotope is taken. Setting the parameters of the cascade to obtain BF_3 with a given concentration of ^{10}B is carried out by changing the values of the feed flows, the light and heavy fractions of the cascade, the number of the stage to which the feed is supplied. The results of calculations and optimization of the cascade of gas centrifuges for obtaining 1 g/s BF_3 enriched by ^{10}B to 95 weight % in the enrichment part and ^{11}B up to 99.9 weight % in the depletion part of the cascade are given in [64]. It has been shown that 736 steps are required to achieve these concentrations, with a feed flow (4.798 g/s of natural BF_3) being supplied in 516 steps [64].

The disadvantage of this separation method is the low content of boron in the volatile chemical boron compound used: 1000 g of BF_3 with natural isotopic composition contains about 159 g of boron. That is, about 16% of the separating power of the cascade is spent on the separation of boron isotopes, and the remaining 84% is spent on the transfer of monoisotopic fluorine between gas centrifuges [62, 63].

The efficiency of the cascade is directly proportional to the content of the target chemical element in the working gas. To ensure the required performance of a gas centrifuge cascade for the separation of boron isotopes using BF_3 as a working substance, high capital costs are required, associated with a large number of main and auxiliary equipment used. In addition, BF_3 is a highly corrosive substance that reacts with structural materials, which leads to the formation and accumulation of non-volatile corrosion deposits on the internal surfaces of the equipment and reduces its service life [62, 63].

In JSC “Production Association “Electrochemical Plant””, Zelenogorsk, proposed to use a volatile chemical compound of boron, trimethylborane $B(CH_3)_3$, as a working gas. $B(CH_3)_3$ is an organic alkyl compound of boron, a colorless gas. In addition to boron, $B(CH_3)_3$ contains polyisotopic chemical elements carbon and hydrogen, each of which has two isotopes. Therefore, $B(CH_3)_3$ is a mixture of 5 components with a molecular weight of 55 to 59 u. The ^{10}B isotope is almost completely concentrated in the component with a molecular mass of 55 u. (about 97% of the total isotope). The main advantage of $B(CH_3)_3$ is the proportion of boron in the working gas, which is 0.193 (for BF_3 - 0.159), which is 21% more than in BF_3 . Thus, using $B(CH_3)_3$ as the working substance in the cascade, it is possible to obtain the ^{10}B isotope with a concentration close to 100% [63].

* *

*

Thus, as a result of the review and analysis of literature sources, it has been shown that boron isotopes have unique nuclear properties, due to which they are widely used in the nuclear and chemical industries, medicine, and instrument making. It is shown that the main use of ^{10}B is reactor building. Annual consumption of ^{10}B with a relative concentration of 92-96 weight % in reactor building is about 2000 kg, and due to the development of nuclear energy based on fast neutron reactors, it will steadily increase [65, 66]. In this regard, work on the creation of an efficient and economical industrial technology and a plant for the separation of boron isotopes is relevant and in demand.

The analysis of the advantages and disadvantages of the considered separation methods showed that the method of chemical isotope exchange between BF_3 and its thermally unstable complex with anisole is the most suitable for solving the problem of producing highly enriched boron isotopes in the required quantities, since it can be implemented at a low temperature, atmospheric pressure with the use of chemically and thermally stable components, the production of which is industrially established. This method is quite efficient (has a high separation factor), productive, economical (simplicity of manufacture and operation of equipment) and allows thermal inversion of phase flows.

2 Method for calculating column

2.1 Object of study

The object of study are column apparatuses of various capacities with sieve plates designed for the separation of boron isotopes by the method of chemical isotope exchange with thermal reversal of flows in the system of boron trifluoride and its molecular complex compound with anisole.

2.2 Formulation of the purpose

When calculating column apparatuses, an engineer is faced with many different options for implementing the separation process. To select the optimal option, you have to perform a large amount of work. The simplest solution to this problem is the use of personal computers.

Thermal reversal of flows and the use of a complexing agent as an extractant makes it possible to reduce the calculation of the process of chemical isotope exchange in the system of boron trifluoride and its molecular complex compound with anisole to the calculation of extractive distillation (the complex compound is formed in the absorber and flows down as a phlegm and completely dissociates in the desorber from where it is discharged for reuse). In this case, the low-boiling component (LBC) of the mixture is $^{11}\text{BF}_3$ (due to the “inversion” of the separation described above), and the high-boiling component (HBC) is $^{10}\text{BF}_3$ [67].

Known methods for calculating column apparatuses [68-86], used in practice for isotope separation, are divided into analytical and graphic [68, 69, 71, 75, 76, 83]. In the case of separation of such mixtures, these methods have significant limitations: graphical methods introduce a large error due to the small scale of the graphs used to determine the reflux ratio and number theoretical separation stages (NTS).

Graphical methods use empirical corrections, which are determined mainly for the oil refining and chemical industries. Analytical methods are too laborious

and require a large number of calculations of the same type and a significant calculation time.

Thus, it is obvious that with the modern development of computer technology, graphical methods are outdated and are not suitable for calculating the technological parameters of such systems. The existing shortcomings of analytical methods can be eliminated by adapting existing methods for calculating technological parameters and design characteristics for isotope separation using a computer to increase the speed and accuracy of the calculations.

In this work, the methods for calculating column apparatus used in the chemical and oil industries will be improved in accordance with the features and known experimental data on isotope separation.

The definition of the main technological parameters of the ongoing process is incorporated in the technological methodology. Justification of the dimensions of the column and the design of its internal contact devices, providing the required degree of separation of the initial mixture at a given performance - in the design method.

In improved methods for calculating the process of chemical isotope exchange with thermal inversion of flows in column apparatus, the following assumptions are made:

1. There are no heat losses of the column to the environment.
2. The heat of mixing of the mixture components at theoretical stages is zero.
3. The temperature in the column is unchanged.
4. The pressure in the column is constant.
5. The costs of material flows along the height of the column are unchanged.
6. The concentration of the target component in the nodes of the column does not change.
7. When calculating the technological parameters of the separation process, the content of the complexing agent is not taken into account.

Improved calculation methods are implemented using a block approach to describing algorithms in the PTC MathCad Prime software environment, which allows you to quickly upgrade each block of the algorithm.

PTC MathCad Prime is designed for automated mathematical modeling with the ability to document all calculations in the form of equations and expressions [87].

2.3 Algorithm for technological calculation of column apparatus

The technological calculation algorithm is designed to justify the operating parameters of the process (pressure and temperature in the system, reflux ratio, NTS), which ensure the separation of the initial mixture into components of the required concentration, material flows are also determined and consumption rates are specified.

The block diagram of the technological calculation algorithm proposed by us is shown in Figure 2.1.

The initial data necessary for carrying out the technological calculation are given in Table 2.1. The beginning of the calculation is the input of initial data into the program form.

The initial mixture is fed into the column apparatus in the form of a vapor mixture. Then, according to the accepted assumptions, the concentration of LBC in the extraction and waste streams does not change after transformation in the circulation nodes of the stream. That's why $y_{Pmas} = x_{Pmas}$ и $y_{Wmas} = x_{Wmas}$.

Table 2.1 – Initial data for technological calculation

№	Parameter name	Units
1	Operating temperature in the column: T	K
2	Separation factors: α	
3	Operating pressure in the column: p	MPa
4	Molecular weights $^{11}\text{BF}_3$ (M_{LBC}) и $^{10}\text{BF}_3$ (M_{HBC})	kg/kmol
5	Molecular weight of the complexing agent (anisole) M_{Anisole}	kg/kmol
6	Concentration LBC in the initial mixture (y_{Fmas}), in product flows (y_{Pmas}) in dump streams (y_{Wmas})	kg/kg
7	The productivity of the column apparatus ^{10}B (C)	t/year
8	Density BF_3 (ρ_{BF_3}) and complex compound (ρ_{complex}) at operating temperature	kg/m ³

Next, the conversion of mass concentrations (y_{Fmas} , x_{Pmas} , x_{Wmas}) into molar ones is carried out using the formulas [72, 82]:

$$y_{Fmol} = \frac{\frac{y_{Fmas}}{M_{LBC}}}{\frac{y_{Fmas}}{M_{LBC}} + \frac{1 - y_{Fmas}}{M_{HBC}}} \text{ [kmol/kmol]}, \quad (2.1)$$

$$x_{Pmol} = \frac{\frac{x_{Pmas}}{M_{LBC}}}{\frac{x_{Pmas}}{M_{LBC}} + \frac{1 - x_{Pmas}}{M_{HBC}}} \text{ [kmol/kmol]}, \quad (2.2)$$

$$x_{Wmol} = \frac{\frac{x_{Wmas}}{M_{LBC}}}{\frac{x_{Wmas}}{M_{LBC}} + \frac{1 - x_{Wmas}}{M_{HBC}}} \text{ [kmol/kmol]}, \quad (2.3)$$

where M_{LBC} и M_{HBC} – molecular weights LBC ($^{11}\text{BF}_3$) and HBC ($^{10}\text{BF}_3$) mixtures [kg/kmol].

Then, using the concentration of LBC in the initial mixture (y_{Fmol}) and the equation of the equilibrium curve, the concentration of LBC in the liquid phase is found:

$$x_{Fmol} = \frac{y_{Fmol}}{\alpha \cdot (\alpha - 1) \cdot y_{Fmol}} \text{ [kmol/kmol]}. \quad (2.4)$$

The mass concentration of LBC in the liquid phase is found by the formula:

$$x_{Fmas} = \frac{M_{LBC} \cdot x_{Fmol}}{M_{LBC} \cdot x_{Fmol} + M_{HBC} \cdot (1 - x_{Fmol})} \text{ [kg/kg]}. \quad (2.5)$$

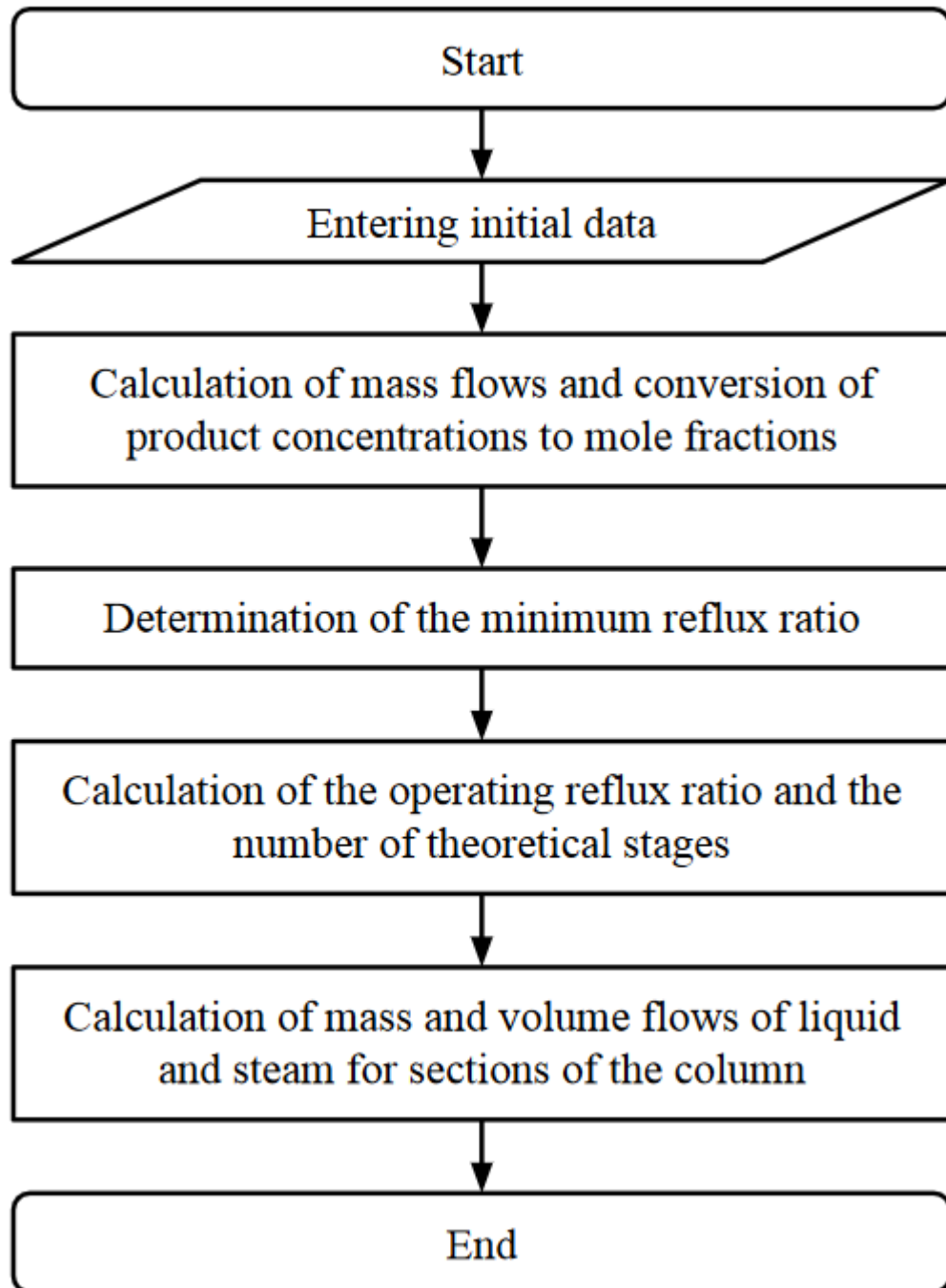


Figure 2.1 – Block diagram of the technological calculation of column apparatus

Then, using the reaction of formation of $^{10}\text{BF}_3$, preliminary calculations are carried out, during which the total mass flow rate of the working substance is determined – $^{10}\text{BF}_3$ in the waste stream containing a given amount of ^{10}B [3]:



The calculation of the amount of substance ^{10}B is carried out according to the formula:

$$v(^{10}\text{B}) = \frac{m(^{10}\text{B})}{M(^{10}\text{B})} \text{ [kmol]}, \quad (2.7)$$

where $m(^{10}\text{B})$ – weight ^{10}B , according to the specified performance (C), [kg];

$M(^{10}\text{B})$ – molecular mass ^{10}B , [kg/kmol].

The mass of the required $^{10}\text{BF}_3$ is determined taking into account equation (2.7) by the formula:

$$m(^{10}\text{BF}_3) = v(^{10}\text{B}) \cdot M(^{10}\text{BF}_3) \text{ [kg]}, \quad (2.8)$$

where m – mass required $^{10}\text{BF}_3$, [kg];

M – molecular mass $^{10}\text{BF}_3$, [kg/kmol].

It is assumed that there are 300 working days (7200 hours) in a year. Therefore, the value of the dump flow rate is determined by the formula:

$$W = \frac{m(^{10}\text{BF}_3)}{7200 \cdot 3600} \text{ [kg/s]}. \quad (2.9)$$

According to the initial data, the concentration ^{10}B in the dump flow is $(1 - x_{W_{mas}})$, then the total mass flow of the dump for ^{10}B and ^{11}B will be equal to:

$$W_{mas} = \frac{W}{1 - x_{W_{mas}}} \text{ [kg/s]}. \quad (2.10)$$

With the help of the total flow of the waste of the column apparatus (W_{mas}) calculated by the formula (2.10) and the LBC concentrations from the initial data, on the basis of the material balance equations, the values of the feed and selection flows are determined [69, 71, 76, 83, 89]:

$$\begin{cases} F_{mas} = P_{mas} + W_{mas}, \\ F_{mas} \cdot x_{F_{mas}} = P_{mas} \cdot x_{P_{mas}} + W_{mas} \cdot x_{W_{mas}} \end{cases}, \text{ [kg/s]}. \quad (2.11)$$

where F_{mas} , P_{mas} , W_{mas} , [kg/s] – mass flow rate of the initial mixture, product and waste flows;

$x_{F_{mas}}$, $x_{P_{mas}}$, $x_{W_{mas}}$, [kg/kg] – mass fraction of LBC in the initial mixture, in the product and waste flows.

After the transformation of the system (2.11), the calculation of the mass flows of feed and product is carried out:

$$\begin{cases} P_{mas} = \frac{W_{mas} \cdot (x_{Wmas} - x_{Fmas})}{x_{Fmas} - x_{Pmas}} & [\text{kg/s}], \\ F_{mas} = P_{mas} + W_{mas} \end{cases} \quad (2.12)$$

Then the molar flow rates of the main flows of the column apparatus are calculated [72, 82]:

$$\begin{cases} F_{mol} = \frac{F_{mas}}{M_F}, \\ P_{mol} = \frac{P_{mas}}{M_P}, \\ W_{mol} = \frac{W_{mas}}{M_W}, \end{cases} \quad [\text{kmol/s}], \quad (2.13)$$

where M_F, M_P, M_W , – molar mass of the feed mixture, product and waste flows:

$$M_F = M_{LBC} \cdot x_{Fmol} + M_{HBC} \cdot (1 - x_{Fmol}) \quad [\text{kg/kmol}], \quad (2.14)$$

$$M_P = M_{LBC} \cdot x_{Pmol} + M_{HBC} \cdot (1 - x_{Pmol}) \quad [\text{kg/kmol}], \quad (2.15)$$

$$M_W = M_{LBC} \cdot x_{Wmol} + M_{HBC} \cdot (1 - x_{Wmol}) \quad [\text{kg/kmol}]. \quad (2.16)$$

The steam and liquid load of the column apparatus is determined by the operating reflux ratio (R) – one of the main parameters that determine the size of capital investments and operating costs for the implementation of processes in column apparatus. Therefore, the choice of the optimal value of the working reflux ratio is a very responsible and important task [73, 78, 79].

The technological algorithm contains three options for determining the working reflux ratio. The simplest way to calculate it approximately is the Gililand method [68, 72, 74], which uses the empirical equation:

$$R = 1.3 \cdot R_{min} + 0.3, \quad (2.17)$$

where R_{min} – minimum reflux ratio.

This method arose as a result of analyzing the operation of a large number of laboratory, experimental and industrial distillation columns used in the chemical and oil industries [68, 72, 74].

To determine the minimum reflux ratio, two main calculation methods are used: by the equation of the phase equilibrium curve and Underwood [78, 80, 81].

The calculation method using the equation of the phase equilibrium curve consists in calculating the LBC concentration in a liquid that is in equilibrium with the feed mixture in the vapor phase and substituting it into the equation [80]:

$$R_{min} = \frac{x_{Pmol} - y_{Fmol}}{y_{Fmol} - x_{Fmol}}, \quad (2.18)$$

where x_{Fmol} – LBC concentration in the liquid in equilibrium with the feed vapor [kmol/kmol].

This method is used when the separation factor of the rectification process is not determined (it is found x_{Fmol} using the phase equilibrium curve obtained as a result of the approximation of experimental data), as well as in graphical implementation (when working lines are plotted on the phase equilibrium diagram) in approximate calculations, which lose by accuracy of analytical calculation.

The Underwood method is more often used for isotope separation [77, 78, 89, 92]. In it, the minimum reflux value is calculated by the formula (for feeding in the form of a steam mixture):

$$R_{min} = \frac{1}{\alpha - 1} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot x_{Pmol}}{y_{Fmol}} - \frac{1 - x_{Pmol}}{1 - y_{Fmol}} \right). \quad (2.19)$$

Underwood's method allows calculating the values of this parameter for power flows in different phase states. This method is also often used in calculating the separation of multicomponent systems, for which methods using the equation of the phase equilibrium curve are inefficient [77, 78, 89, 92].

The operating reflux ratio can also be determined using the coefficient excess reflux β [73, 77, 83]:

$$R = R_{min} \cdot \beta, \quad (2.20)$$

where β – coefficient excess reflux ratio, in works on isotope separation it is recommended to use values from 1.1 to 5.0 [73, 77, 83].

The third way to set the working reflux number is its manual entry into the calculation form.

For all options for determining the working reflux ratio, the calculation of the NTS consists in solving the system of phase equilibrium equations and the corresponding working line:

$$\begin{cases} y_{equil} = \frac{\alpha \cdot x}{1 + (\alpha - 1) \cdot x} \\ y_{work.up} = \frac{R}{R+1} \cdot x + \frac{x_{Pmol}}{R+1} \end{cases}, \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} y_{equil} = \frac{\alpha \cdot x}{1 + (\alpha - 1) \cdot x} \\ y_{work.low} = \frac{R+f}{R+1} \cdot x - \frac{1-f}{R+1} x_{Wmol} \end{cases}, \quad (2.22)$$

where $y_{equil}(x)$ – equation of the phase equilibrium line;

$y_{work.up}(x)$ – working line equation for the top (strengthening) section;

$y_{work.low}(x)$ – working line equation for the lower (exhaustive) section;

$f = \frac{F_{mol}}{P_{mol}}$ – relative molar flow rate [kmol/s].

The concentration of LBC (x) is substituted into the equation of phase equilibrium $y_{equil}(x)$, as a result of which the concentration of LBC in the vapor phase is determined. Further, using the equation of the working line of the section ($y_{work.up}(x)$ or $y_{work.low}(x)$), the corresponding concentration of LBC in the liquid phase is determined. This iteration corresponds to one theoretical separation step. The found LBC concentration in the liquid phase is used for the next iteration. The calculation continues until the LBC concentration in the liquid reaches the required concentration of the target component (in accordance with the given boundary conditions) [73, 76, 85].

The total NTS in the column is the sum of the steps of all sections of the column. In practice, the Gilliland method is also used for approximate calculation of NTS [85]:

$$N = \frac{N_{\min} + g}{1 - g}, \quad (2.23)$$

where g calculated using the empirical formula [85]:

$$g = 0.663 - 1.0628 \cdot \left(\frac{R - R_{\min}}{1 + R} \right) + 0.4227 \cdot \left(\frac{R - R_{\min}}{1 + R} \right)^2; \quad (2.24)$$

N_{\min} – the minimum number of required PTS is found using the Fenske equation [44, 46, 73]:

$$N_{\min} = \ln \left(\frac{x_{Pmol}}{1 - x_{Pmol}} \cdot \frac{1 - x_{Wmol}}{x_{Wmol}} \right) \cdot \ln \alpha^{-1}. \quad (2.25)$$

It is assumed in the calculation that the height of the column is directly proportional to the NTS, and the diameter of the column is directly proportional to R , therefore, the volume of the column will depend on the value of $N \cdot (R+1)$.

The optimal working reflux ratio R and the corresponding amount of NTS are determined from the minimum of the dependence on R with a given change step $\beta - 0.01$. When using such a step of changing β in the range of its values from 1.1 to 5.0, a dependence on R was obtained $N \cdot (R+1)$, an example of which is shown in Figure 2.2.

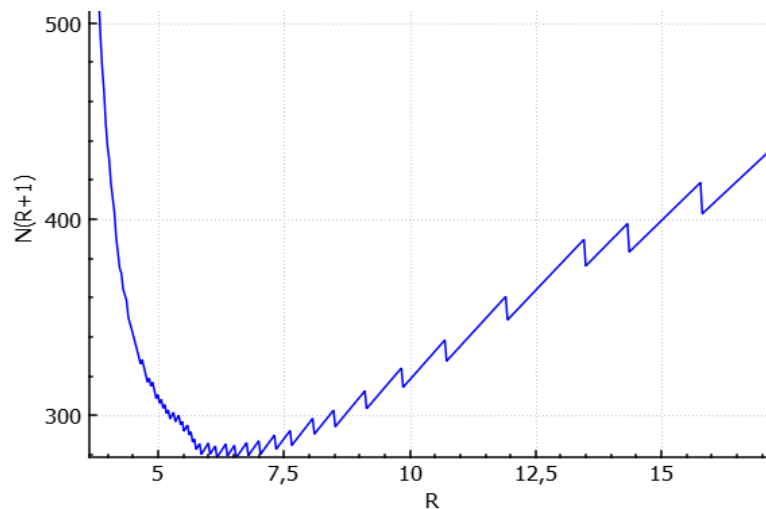


Figure 2.2 – Dependence $N \cdot (R+1)$ on R

As a result, instead of a smoothed approximation of the curve, a sawtooth shape is obtained, the minimum values of which correspond to the minimum values of the reflux ratio at a constant number of theoretical steps. This makes it possible to more accurately determine the NTS in the column and at the same time refuse to use empirical corrections.

The calculation of the steam number characterizing the operating mode of the lower flow circulation unit is carried out according to the formula:

$$\theta = \frac{x_{Fmol} - x_{Wmol}}{x_{Pmol} - x_{Fmol}} \cdot R. \quad (2.26)$$

Next, the flow rates of steam and liquid in the sections of the column are calculated. Figure 2.3 shows the material flows of a column apparatus for chemical isotope exchange with thermal inversion of flows in the system of boron trifluoride and its molecular complex compound with anisole.

For the upper and lower sections of the column, the molar flow rates of steam and liquid are calculated [80, 83]:

$$G_{up.mol} = (R + 1) \cdot P_{mol} \quad [\text{kmol/s}], \quad (2.27)$$

$$G_{low.mol} = (R + 1) \cdot P_{mol} - F_{mol} \quad [\text{kmol/s}], \quad (2.28)$$

$$G_{mol} = G_{mol} - P_{mol} \quad [\text{kmol/s}], \quad (2.29)$$

$$L_{mol} = L_{low.mol} = R \cdot P_{mol} \quad [\text{kmol/s}]. \quad (2.30)$$

Next, the average concentrations of ^{11}B in the liquid and vapor phases are determined for the upper (strengthening) and lower (exhausting) sections of the column apparatus [80, 83]:

$$x_{up.aver} = \frac{x_{Fmol} + x_{Pmol}}{2} \quad [\text{kmol/kmol}], \quad (2.31)$$

$$x_{low.aver} = \frac{x_{Wmol} + x_{Fmol}}{2} \quad [\text{kmol/kmol}], \quad (2.32)$$

$$y_{up.aver} = \frac{R}{R + 1} \cdot x_{up.aver} + \frac{x_{Pmol}}{R + 1} \quad [\text{kmol/kmol}], \quad (2.33)$$

$$y_{low.aver} = \frac{R+f}{R+1} \cdot x_{low.aver} - \frac{1-f}{R+1} x_{Wmol} \quad [\text{kmol/kmol}], \quad (2.34)$$

где $x_{up.aver}$, $x_{low.aver}$, $y_{up.aver}$, $y_{low.aver}$ – average LBC concentrations in the liquid and vapor phases for sections of the column apparatus.

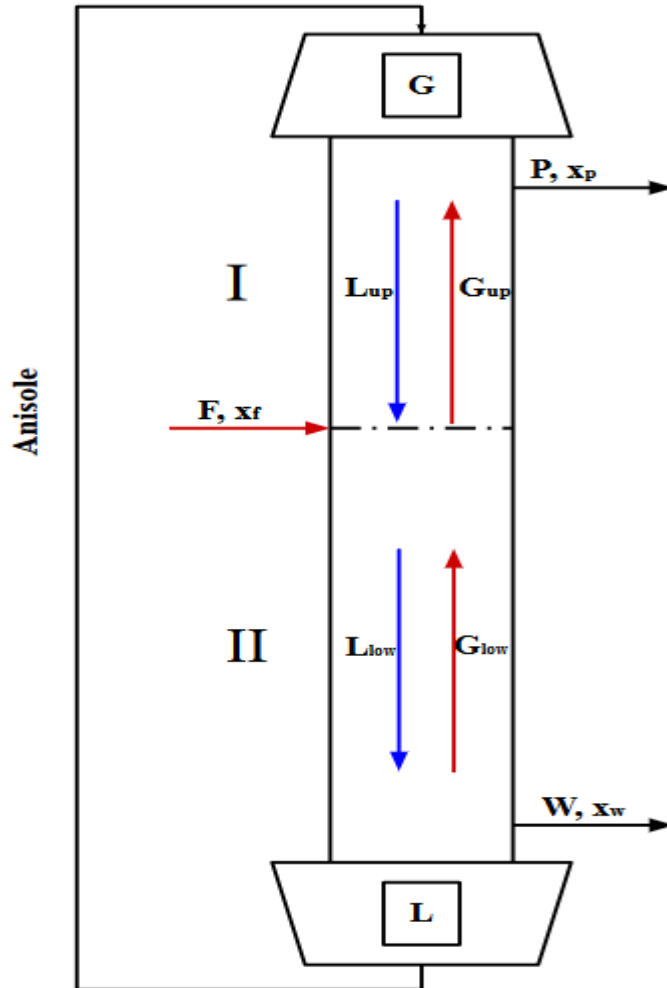


Figure 2.3 – Material flows in the column:

I – upper (exhaustive) section of the column, II – lower (strengthening) section of the column,

L_{up} , G_{up} – liquid and vapor flows at the top of the column,

L_{low} , G_{low} – liquid and vapor flows at the bottom of the column,

L , G – the total amount of substance in the liquid and vapor phases supplied to the flow circulation nodes,

F – vapor phase feed flow with concentration $^{11}\text{B} - y_{Fmas}$,

P – vapor phase extraction stream with concentration $^{11}\text{B} - y_{Pmas}$,

W – waste stream in vapor phase with concentration $^{11}\text{B} - y_{Wmas}$

The next step is the calculation of the average molecular weights of the liquid and vapor in the column sections [72, 74]:

$$Mx_{up.aver} = M_{LBC} \cdot x_{up.aver} + M_{HBC} \cdot (1 - x_{up.aver}) \quad [\text{kmol/kmol}], \quad (2.35)$$

$$Mx_{low.aver} = M_{LBC} \cdot x_{low.aver} + M_{HBC} \cdot (1 - x_{low.aver}) \quad [\text{kmol/kmol}], \quad (2.36)$$

$$My_{up.aver} = M_{LBC} \cdot y_{up.aver} + M_{HBC} \cdot (1 - y_{up.aver}) \quad [\text{kmol/kmol}], \quad (2.37)$$

$$My_{low.aver} = M_{LBC} \cdot y_{low.aver} + M_{HBC} \cdot (1 - y_{low.aver}) \quad [\text{kmol/kmol}], \quad (2.38)$$

где $Mx_{up.aver}$ и $Mx_{low.aver}$ – average molecular weights of steam in the upper and lower sections of the column; $My_{up.aver}$ и $My_{low.aver}$ – average molecular weights of the liquid in the upper and lower sections of the column.

Then the molar flows of vapor and liquid are converted into mass flows:

$$G_{up.mas} = G_{up.mol} \cdot My_{up.aver} \quad [\text{kg/s}], \quad (2.39)$$

$$G_{low.mas} = G_{low.mol} \cdot My_{low.aver} \quad [\text{kg/s}], \quad (2.40)$$

$$G_{mas} = G_{mol} \cdot M_P \quad [\text{kg/s}], \quad (2.41)$$

$$L_{up.mas} = L_{up.mol} \cdot Mx_{up.aver} \quad [\text{kg/s}], \quad (2.42)$$

$$L_{low.mas} = L_{low.mol} \cdot Mx_{low.aver} \quad [\text{kg/s}]. \quad (2.43)$$

In the upper flow reversal node, all incoming vapor (G_{mas}) interacts with anisole and forms a complex compound according to reaction (1.9). The amount of anisole required for the formation of a complex compound is calculated by the formula:

$$L_{anisole.mas} = \frac{G_{mas} \cdot M_{anisole}}{M_P} \quad [\text{kg/s}]. \quad (2.44)$$

Then the total amount of substance in the liquid phase leaving the upper flow circulation node for different sections can be found using the formulas:

$$L_{up.complex.mas} = L_{up.mas} + L_{anisole.mas} \quad [\text{kg/s}], \quad (2.45)$$

$$L_{low.complex.mas} = L_{low.mas} + L_{anisole.mas} \quad [\text{kg/s}], \quad (2.46)$$

Then, the volumetric flows of vapor and liquid in the sections of the column are calculated. To do this, it is necessary to determine the density of boron trifluoride and the complex compound of boron trifluoride with anisole at operating temperature.

The density of boron trifluoride (ρ_{BF_3}) is determined from the reference data [3], and for the complex compound, the empirical expression is used:

$$\rho_{complex} = 2309.2 - 3.698 \cdot T \text{ [kg/m}^3\text{]}. \quad (2.47)$$

Next, the values of the volumetric flows of steam and liquid are calculated for the sections of the column, as well as in the feed, product and waste:

$$V_F = \frac{F_{mas}}{\rho_{BF_3}} \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (2.48)$$

$$V_P = \frac{P_{mas}}{\rho_{BF_3}} \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (2.49)$$

$$V_W = \frac{W_{mas}}{\rho_{BF_3}} \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (2.50)$$

$$V_{L_{up}} = \frac{L_{up,complex,mas}}{\rho_{complex}} \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (2.51)$$

$$V_{L_{low}} = \frac{L_{low,complex,mas}}{\rho_{complex}} \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (2.52)$$

$$V_{G_{up}} = \frac{G_{up,mas}}{\rho_{complex}} \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (2.53)$$

$$V_{G_{low}} = \frac{G_{low,mas}}{\rho_{complex}} \text{ [m}^3\text{/s]}. \quad (2.54)$$

This concludes the technological calculation.

2.4 Algorithm for structural calculation of column apparatus

Recently, there has been a trend towards the use of disc contact devices for

the separation of isotopes of light elements. The most common type of disc contact devices for these tasks are sieve plates. These contact devices have a simple design, ease of installation and repair, low hydraulic resistance and sufficiently high efficiency.

The structural calculation algorithm is designed to determine the main dimensions of the column apparatus (diameter and height), maximum and minimum loads, hydraulic resistance when using sieve disc contact devices.

The initial data for carrying out structural analysis are the results of technological calculation. The block diagram of the structural calculation proposed by us is shown in Figure 2.4.

The beginning of the calculation is to determine the range of stability of the operation of disc contact devices:

$$A_0 = \frac{K_{max}}{K_{min}}, \quad (2.55)$$

where K_{max} – power flow load increase factor; K_{min} – power flow load reduction factor.

For sieve trays, according to [85, 88], the value A_0 should be less than 2. If the stability range exceeds the specified value, then this type of contact device does not satisfy the initial data. It is necessary to change the values of the coefficients K_{max} , K_{min} .

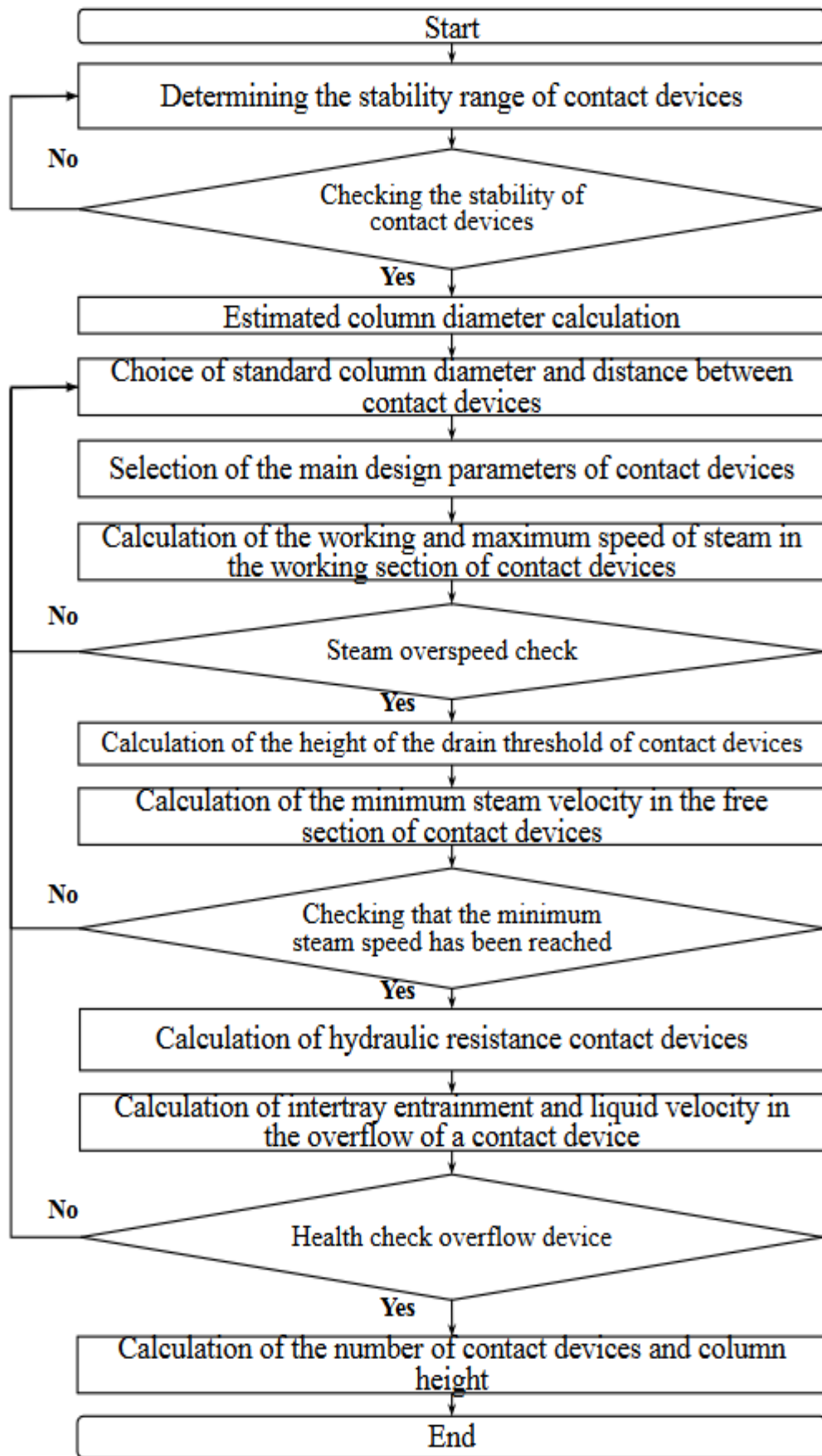


Figure 2.4 – Block diagram of the structural calculation of column apparatus for sieve disc contact devices

Next, the values of the estimated maximum allowable steam velocity in the column sections are calculated:

$$W_{max.up} = C_{max.up} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{complex} - \rho_{BF_3}}{\rho_{BF_3}}} \text{ [m/s]}, \quad (2.56)$$

$$W_{max.low} = C_{max.low} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{complex} - \rho_{BF_3}}{\rho_{BF_3}}} \text{ [m/s]}, \quad (2.57)$$

где $C_{max.up}$, $C_{max.low}$ – coefficients for the upper and lower sections of the column, depending on the type and design of the contact device, the distance between the plates, the values of liquid and steam flows in the sections of the column. These coefficients are calculated by the formulas:

$$C_{max.up} = 8.47 \cdot 10^{-5} \cdot (1.2 \cdot C_1 - 5 \cdot (\lambda_{up} - 35)), \quad (2.58)$$

$$C_{max.low} = 8.47 \cdot 10^{-5} \cdot (1.2 \cdot C_1 - 5 \cdot (\lambda_{low} - 35)), \quad (2.59)$$

where C_1 – coefficient depending on the chosen standard distance between disc contact devices [85, 88] is found using figure 2.5; λ_{up} , λ_{low} – coefficients for the upper and lower sections of the column, depending on the type and design of the contact device, the values of the liquid vapor flows in the sections of the column.

For sieve disc contact devices, these coefficients are calculated by the formulas:

$$\lambda_{up} = \frac{0.655 \cdot L_{up.complex.mas}}{\rho_{complex}} \cdot \sqrt{\frac{1.2 \cdot C_1}{V_{L_{up}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{complex} - \rho_{BF_3}}{\rho_{BF_3}}}}, \quad (2.60)$$

$$\lambda_{low} = \frac{0.655 \cdot L_{low.complex.mas}}{\rho_{complex}} \cdot \sqrt{\frac{1.2 \cdot C_1}{V_{L_{low}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{complex} - \rho_{BF_3}}{\rho_{BF_3}}}}. \quad (2.61)$$

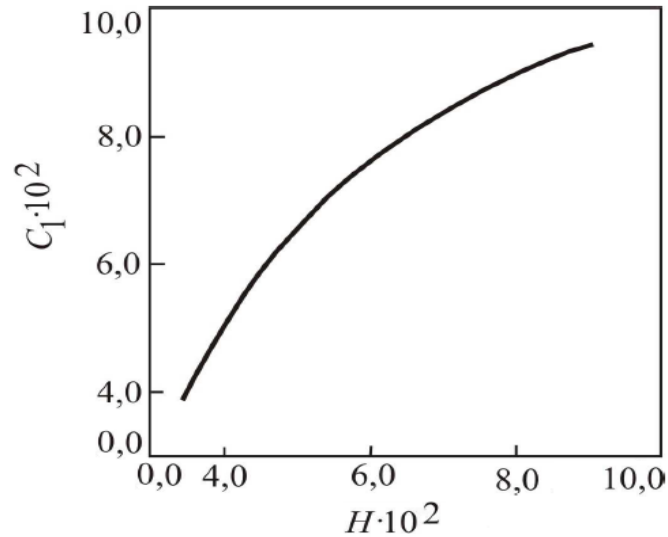


Figure 2.5 – Dependence of the coefficient C_1 on the distance between the disc contact devices

Then, the estimated diameter of the column apparatus for the upper and lower sections is calculated:

$$D_{Asses.up} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{G_{up}}}{\pi \cdot W_{max.up}}} \text{ [m]}, \quad (2.62)$$

$$D_{Asses.low} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{G_{low}}}{\pi \cdot W_{max.low}}} \text{ [m]}. \quad (2.63)$$

From the standard series of column diameters [88], the value closest to the estimated value is selected – D_{up} , D_{low} .

The next step is to calculate the free section of the column apparatus:

$$S_{free.up} = 0.785 \cdot D_{up}^2 \text{ [m}^2\text{]}, \quad (2.64)$$

$$S_{free.low} = 0.785 \cdot D_{low}^2 \text{ [m}^2\text{]}. \quad (2.65)$$

The steam velocity in the sections of the column apparatus is calculated by the formulas:

$$W_{up} = \frac{V_{G_{up}}}{S_{free.up}} \text{ [m/s]}, \quad (2.66)$$

$$W_{low} = \frac{V_{G_{low}}}{S_{free,low}} \text{ [m/s]}. \quad (2.67)$$

Next, the values of the steam load factor for the sections of the column apparatus are calculated:

$$fv_{up} = W_{up} \cdot \sqrt{\rho_{BF_3}} \left[\sqrt{\frac{\text{kg}}{\text{m}}} \cdot \text{s} \right], \quad (2.68)$$

$$fv_{low} = W_{low} \cdot \sqrt{\rho_{BF_3}} \left[\sqrt{\frac{\text{kg}}{\text{m}}} \cdot \text{s} \right], \quad (2.69)$$

In accordance with the selected standard column diameter from [83, 85, 88], the design parameters of the sieve plate are selected:

- drain perimeter: p_{drain} , [m];
- relative cross section of the overflow: for the upper section – s_{up} , for the lower section – s_{low} , [%].

Then the relative working section of the selected sieve plate of the column apparatus is calculated:

$$S_{rel.up} = 1 - 0.02 \cdot s_{up}, \quad (2.70)$$

$$S_{rel.low} = 1 - 0.02 \cdot s_{low}. \quad (2.71)$$

The calculation of the maximum allowable speed in steam in the working section of the plate for the upper and lower sections of the column is calculated by the formulas:

$$W_{S,up} = 0.549 \cdot \sigma^{0.2} \cdot B_{1up} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{complex} - \rho_{BF_3}}{\rho_{BF_3}}} \text{ [m/s]}, \quad (2.72)$$

$$W_{S,low} = 0.549 \cdot \sigma^{0.2} \cdot B_{1low} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{complex} - \rho_{BF_3}}{\rho_{BF_3}}} \text{ [m/s]}, \quad (2.73)$$

where σ [mh/m] – intense tension of the boron trifluoride-anisole complex at high temperature; B_{1up} – coefficient for the upper section of the column, depending on

the distance between the plates and the auxiliary coefficient $\frac{L_{up.mas}}{G_{up.mas}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{BF_3}}{\rho_{complex}}}$, is found using linear data interpolation [88]; B_{low} – coefficient for the lower section of the column, depending on the distance between the plates and the auxiliary coefficient $\frac{L_{low.mas}}{G_{low.mas}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{BF_3}}{\rho_{complex}}}$, is found using linear data interpolation [88].

Then, the conditions for the maximum allowable steam velocity in the working section of the plate are checked:

$$K_{max} \cdot W_{up} < W_{S.up} \cdot S_{rel.up}, \quad (2.74)$$

$$K_{max} \cdot W_{low} < W_{S.low} \cdot S_{rel.low}. \quad (2.75)$$

If these conditions are not met, the next standard value of the distance between the plates is selected for a given column diameter and the calculation is carried out starting from formula (2.72). If it is impossible to increase the distance between the trays, the diameter of the tray should be increased to the next one from the standard series and the calculation should be carried out starting from formula (2.62).

When the conditions (2.74, 2.75) are met, the specific load per unit length of the drain perimeter is calculated and a check is made for exceeding the permissible value:

$$L_{up.spec} = \frac{V_{L_{up}}}{P_{drain}} < 0.0017 \text{ [m}^2\text{/s]}, \quad (2.76)$$

$$L_{low.spec} = \frac{V_{L_{low}}}{P_{drain}} < 0.0017 \text{ [m}^2\text{/s]}. \quad (2.77)$$

If the drain load does not pass the test, the next diameter from the standard range is selected and the calculation starts again with formula (2.62). When the conditions (2.76), (2.77) are met, the calculation of the liquid backwater above the drain threshold of the tray for various sections of the column apparatus is carried out:

$$h_{b.up} = 1.44 \cdot (L_{up.spec})^{\frac{2}{3}} \text{ [m]}, \quad (2.78)$$

$$h_{b.low} = 1.44 \cdot (L_{low.spec})^{\frac{2}{3}} \text{ [m]}. \quad (2.79)$$

Calculation of the minimum bubbling depth on the contact device is carried out using the formula:

$$h_{bubl} = 0.05 \cdot \frac{1000}{\rho_{complex}} \text{ [m]}, \quad (2.80)$$

Then the height of the drain threshold of the contact devices located in different sections of the column apparatus is calculated:

$$h_{h.up} = h_{bubl} - h_{b.up} \text{ [m]}, \quad (2.81)$$

$$h_{h.low} = h_{bubl} - h_{b.low} \text{ [m]}. \quad (2.82)$$

The next step is to calculate the dynamic bubbling depth on the tray contact devices in the sections of the column apparatus:

$$h_{d.up} = (h_{h.up} + h_{b.up}) \cdot \frac{1000}{\rho_{complex}} \text{ [m]}, \quad (2.83)$$

$$h_{d.low} = (h_{h.low} + h_{b.low}) \cdot \frac{1000}{\rho_{complex}} \text{ [m]}, \quad (2.84)$$

Then follows the calculation of the minimum allowable steam velocity in the free section of the disc contact devices located in the sections of the column apparatus:

$$W_{min.up} = \frac{B_{2up} - 9 \cdot (1 - 100 \cdot d_0)}{\sqrt{\rho_{BF_3}}} \text{ [m/s]}, \quad (2.85)$$

$$W_{min.low} = \frac{B_{2low} - 9 \cdot (1 - 100 \cdot d_0)}{\sqrt{\rho_{BF_3}}} \text{ [m/s]}, \quad (2.86)$$

where B_{2up} , B_{2low} – coefficients for the upper and lower sections of the column apparatus, depending on the depth of bubbling. These coefficients are calculated by the formulas:

$$B_{2up} = 21.03 + 1.626 \cdot \ln(h_{d.up}) - 1.85 \cdot 10^{-11} \cdot (h_{d.up})^{-5.65} \cdot \exp(90.33 \cdot h_{d.up}), \quad (2.87)$$

$$B_{2low} = 21.03 + 1.626 \cdot \ln(h_{d.low}) - 1.85 \cdot 10^{-11} \cdot (h_{d.low})^{-5.65} \cdot \exp(90.33 \cdot h_{d.low}), \quad (2.88)$$

where – d_0 – diameter of holes in the sieve cloth of the plate [m]. Selected from the standard range given in the reference literature [85, 87].

The next step is to calculate the relative free section of the disc contact device:

$$f_{O.up} = \frac{W_{up} \cdot K_{min} \cdot 100}{W_{min.up}} [\%], \quad (2.89)$$

$$f_{O.low} = \frac{W_{low} \cdot K_{min} \cdot 100}{W_{min.low}} [\%]. \quad (2.90)$$

Then, from the reference literature [88], the nearest suitable smaller value of the standard relative free section and the pitch between the holes are selected – t [m].

Next, the conditions for achieving the minimum steam velocity in the column apparatus are checked:

$$\frac{W_{min.up} \cdot f_{O.up}}{100} < W_{up} \cdot K_{min}, \quad (2.91)$$

$$\frac{W_{min.low} \cdot f_{O.low}}{100} < W_{low} \cdot K_{min}. \quad (2.92)$$

If these conditions are not met, it is necessary to increase the diameter of the opening of the sieve cloth. When the maximum value of the hole diameter is reached, the diameter of the contact device should be increased.

When these conditions are met, the aeration factor is calculated:

$$\beta_{up} = \frac{0.1}{\frac{30 \cdot W_{up}}{f_{O.up}} + 4} + \frac{0.253}{\sqrt[4]{h_{d.up}}} \quad (2.93)$$

$$\beta_{low} = \frac{0.1}{\frac{30 \cdot W_{low}}{f_{O.low}} + 4} + \frac{0.253}{\sqrt[4]{h_{d.low}}}. \quad (2.94)$$

Then the coefficient of hydraulic resistance of the contact device is calculated:

$$\varepsilon = \left(\frac{d_0}{t} \right)^2 \cdot \left(\frac{t}{0.62 \cdot d_0} - 1 \right)^2. \quad (2.95)$$

Calculation of the hydraulic resistance of contact devices in various sections of the column is carried out using the following formulas:

$$\Delta P_{up} = 5000 \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{fv_{up}}{f_{O.up}} \right)^2 + 9810 \cdot \beta_{up} \cdot h_{d.up} \text{ [Pa]}, \quad (2.96)$$

$$\Delta P_{low} = 5000 \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{fv_{low}}{f_{O.low}} \right)^2 + 9810 \cdot \beta_{low} \cdot h_{d.low} \text{ [Pa]}. \quad (2.97)$$

Then the height of the separation space of the upper and lower sections of the column is calculated:

$$H_{s.up} = h_t - 2.5 \cdot h_{d.up} \text{ [m]}, \quad (2.98)$$

$$H_{s.low} = h_t - 2.5 \cdot h_{d.low} \text{ [m]}. \quad (2.99)$$

The next step is to calculate the intertray entrainment of liquid from the contact device:

$$e_{up} = 5.7 \cdot \frac{10^{-3}}{\sigma} \cdot \left(\frac{W_{up}}{H_{s.up}} \right)^{3.2} \text{ [m]}, \quad (2.100)$$

$$e_{low} = 5.7 \cdot \frac{10^{-3}}{\sigma} \cdot \left(\frac{W_{low}}{H_{s.low}} \right)^{3.2} \text{ [m]}. \quad (2.101)$$

Then, the conditions for the admissibility of intertray entrainment of liquid are checked:

$$e_{up} > 0.1, \quad (2.102)$$

$$e_{low} > 0.1. \quad (2.103)$$

If the conditions are met, you should increase the distance between the contact devices and start the calculation with formula (2.72).

If the conditions are not met, then the calculation of the liquid velocity in the overflow of the contact device is carried out:

$$U_{up} = \frac{V_{L.up} \cdot 100}{S_{free.up} \cdot s_{up}} \text{ [m/s]}, \quad (2.104)$$

$$U_{low} = \frac{V_{L_{low}} \cdot 100}{S_{free.low} \cdot s_{low}} \text{ [m/s]}. \quad (2.105)$$

Next, the calculation of the maximum allowable fluid velocity in the overflow device is carried out:

$$U_{max} = 0.008 \cdot \sqrt{h_t \cdot (\rho_{complex} - \rho_{BF_3})} \text{ [m/s]}. \quad (2.106)$$

Then, the conditions for the allowable liquid velocity in the overflow device are checked:

$$U_{up} < U_{max} \quad (2.107)$$

$$U_{low} < U_{max} \quad (2.108)$$

If the conditions are met, you should increase the distance between the plates and start the calculation with formula (2.72).

If the conditions are not met, the number of valid contact devices in the column is calculated. To move from the number of theoretical plates to the number of real plates, a correction efficiency factor is introduced that takes into account the kinetics of the processes occurring on the plates of the column:

$$N_{real} = \frac{N}{\eta} \text{ [things]}, \quad (2.109)$$

где η – efficiency of disc contact devices [55, 88]

Next, the height of the column apparatus is calculated according to the formula:

$$H = N_{real} \cdot h_t \text{ [m]}, \quad (2.110)$$

This completes the structural calculation of the column apparatus with sieve contact devices.

2.5 Verification of calculation methods

The described methods for calculating the technological parameters and structural characteristics of column apparatus intended for the implementation of rectification and chemical isotope exchange processes have been successfully tested

and verified for the benzene-toluene system. This system was chosen due to the absence in the literature of a set of necessary data for verification on isotopic mixtures and is a test task on multiple confirmed data obtained in the oil industry.

The conditions for carrying out and the main results of the calculation are given in tables 2.2 and 2.3.

Table 2.2 – Initial data for a mixture of benzene-toluene

Feed flow F_{mas} , [kg/s]	5
Operating pressure in column: P , [MPa]	0.101
Molecular weights: M [kg/kmol]:	
Benzene (M_{LBC})	78
Toluene (M_{HBC})	92
Concentration LBC (Benzene) [weight %]:	
in the initial mixture (x_{Fmas})	35
in the product mixture withdrawal flow (x_{Pmas})	98
in waste flow (x_{Wmas})	1.7

Comparative analysis of the results of technological calculation showed their good convergence. Differences appear only when determining the reflux number and the number of separation steps. In [72], the NTS was determined by a graphical method, while in this work, an analytical method was used based on solving the systems of equations of the equilibrium curve and working lines in the sections of the column apparatus. As a result, the parameters depending on the reflux ratio differ from the data [72].

Table 2.3 – The results of the structural calculation of the column apparatus designed to separate the benzene-toluene mixture

Name of parameters	Calculation results	Literature data [72]
Technological calculation		
Operating reflux ratio, R	2.45	2.1
The total number of theoretical stages N [things]	17	22
Mass flow of gas in the upper section of the column $G_{up.mas}$, [kg/s]	6.19	5.58
Mass flow of gas in the lower section of the column $G_{low.mas}$, [kg/s]	6.56	6.04
Mass liquid flow in the top section of the column $L_{up.mas}$, [kg/s]	4.46	3.84
Mass flow of liquid in the lower section of the column $L_{low.mas}$, [kg/s]	9.61	9.29
Structural calculation of a plates column		
Plate type	Sieve	Sieve
Plate construction	TS-R	TS-R
Plate column diameter, D , [m]	1.6	1.8
Diameter of the hole in the plate d_o , [mm]	8	8
Pitch between holes t , [mm]	15	15
Distance between plates, h_t , [m]	0.45	0.5
Number of actual separation stages	25	31
Height of the plates column, H , [M]	15	18
Total hydraulic resistance, ΔP [Pa]	7650	8225

The choice of the type of sieve plate TS-R and the diameter of the column was carried out by the author [72] on the basis of his own experience and recommendations given in the literature. According to our methodology, they are selected taking into account the optimization criterion - the minimum diameter of the column, at which it remains operable. It is shown that the calculation results also

agree satisfactorily. Therefore, this technique allows one to adequately calculate the technological and structural characteristics for tray columns.

Based on the results of the verification of the described methods for calculating the technological parameters and structural characteristics of column apparatuses, a scientific article was published in the Journal of Physics: Conference Series [89].

3 Calculation of the column apparatus for the separation of boron isotopes

Using the technique of technological calculation described above, the main parameters of the process of chemical isotope exchange with thermal reversal of flows in the system of boron trifluoride and its molecular complex compound with anisole, occurring in a column apparatus, are determined. The calculations were carried out for the initial data given in Table 3.1.

Table 3.1 – Initial data for technological calculation

Operating temperature in the column: T , [K]	313
Separation factor [3]: α	1.027
Operating pressure in column: P , [MPa]	0.1
Molecular weights: M [kg/kmol]:	
$^{11}\text{BF}_3$ (M_{LBC})	68
$^{10}\text{BF}_3$ (M_{HBC})	67
complexing agent (anisole) (M_{Anisole})	108.13
Concentration of HBC (^{10}B) [weight %]:	
in the initial mixture (y_{Fmas})	19.82
in the product flow of the mixture enriched in the target isotope (^{10}B), (y_{Wmas})	90÷99.9
in the product flow of the mixture enriched in the side isotope (^{11}B), (y_{Pmas})	10
Performance of the column apparatus in terms of element ^{10}B [t/year]	2
Density of substances at operating temperature [kg/m^3]:	
BF_3 [3] (ρ_{BF_3})	2.52
complex compound [3] (ρ_{complex})	1151.73

The indicated range (90÷99.9 weight %) of concentrations of the target ^{10}B in the selection stream is due to the study of the dependence of the number of theoretical separation stages necessary to achieve the indicated concentrations of ^{10}B . The concentration of the by-product ^{11}B in the waste stream has a fixed value, since, according to [3, 53, 55, 56, 90], an increase in the concentration of ^{11}B is more efficiently achieved in separate distillation columns.

The research results are shown in tables 3.2 and 3.3.

Table 3.2 – The results of the technological calculation of column apparatuses with a target concentration of ^{10}B in the selection stream of 90-95 weight %.

Name of parameters	Target concentration, ^{10}B [weight %]					
	90	91	92	93	94	95
Operating reflux ratio, R	31.30	29.69	29.69	29.69	29.69	29.69
Operating steam number, θ	210.04	202.01	204.85	207.68	210.52	213.36
The total number of theoretical stages N [things]	266	286	292	299	307	316
Number of theoretical stages in the upper section of the column N_{up} [things]	60	64	64	64	64	64
The number of theoretical stages in the lower section of the column N_{low} [things]	206	222	228	235	243	252

Table 3.3 – Results of technological calculation of column apparatuses with a target concentration of ^{10}B in the selection stream of 96-99.9 weight %.

Name of parameters	Target concentration, ^{10}B [weight %]					
	96	97	98	99	99,5	99,9
Operating reflux ratio, R	29.69	29.69	28.54	28.31	28.31	27.62
Operating steam number, θ	216.20	219.03	213.22	214.20	215.55	211.32
The total number of theoretical stages N [things]	327	341	374	410	442	528
Number of theoretical stages in the upper section of the column N_{up} [things]	64	64	68	69	69	72
The number of theoretical stages in the lower section of the column N_{low} [things]	263	277	306	341	373	456

From tables 3.2 and 3.3 it can be seen that the specified concentration of ^{10}B in the selection stream is achieved in each design case. At the same time, the given

reflux and steam numbers characterize the most effective operating conditions for the nodes for reversing the flows of the column apparatus. The dependence of the number of theoretical separation stages required to achieve a given concentration of ^{10}B , provided that the optimal operating parameters of the flow circulation nodes are used, are shown in Figure 3.1.

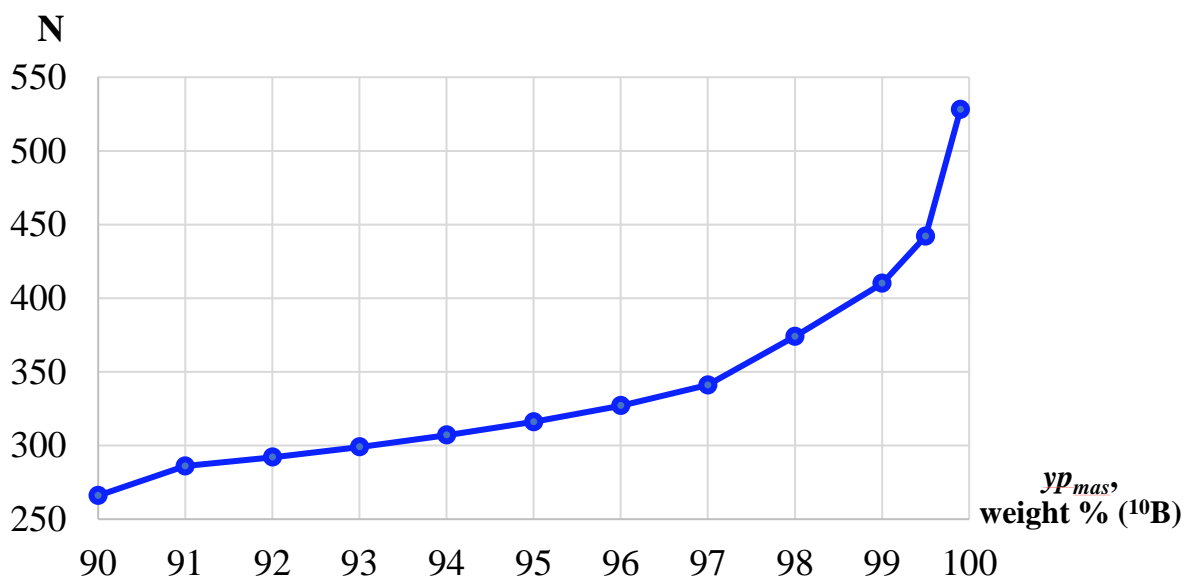


Figure 3.1 – Dependence of the number of theoretical separation steps required to achieve a given concentration of ^{10}B

Figure 3.1 shows that the number of required theoretical separation steps increases linearly from 266 at 90 weight % on ^{10}B to 341 pieces at 97 weight % over ^{10}B . A further increase in the concentration of ^{10}B is accompanied by an exponential increase in the number of theoretical separation steps: at 98 weight % – 374 pieces, at 99 weight % – 410 pieces, at 99.5 weight % – 442 pieces, at 99.9 weight % – 528 pieces.

Thus, it is advisable to use the method of chemical isotope exchange with thermal reversal of flows in the system of boron trifluoride and its molecular complex compound with anisole for the production of ^{10}B with a concentration of up to 97 weight %.

To verify the described technological method of calculation, the most reliable literature data obtained as a result of pre-design calculations of column apparatus for the production of ^{10}B isotopes with a concentration of 96 weight % [3, 59].

The main results of the technological calculation and literature data are shown in Table 3.4, and also published in scientific journals “News of higher educational institutions. Physics” [91] and “Russian Physics Journal” [92].

Table 3.4 – Results of technological calculation of column apparatuses with a given concentration of ^{10}B in a selection stream of 96 weight %.

Name of parameters	Calculation results using the described methods	Literature data [59]
Feed flow F_{mas} , [kg/h]	16.30	16.32
Product flow P_{mas} , [kg/h]	1.94	1.92
Waste flow W_{mas} , [kg/h]	14.36	14.40
Operating reflux ratio, R	29.69	29.73
Operating steam number, θ	216.20	218.94
The total number of theoretical stages N [things]	327	324
Mass flow of gas in the upper section of the column $G_{up.mas}$, [kg/s]	440.50	446.06
Mass flow of gas in the lower section of the column $G_{low.mas}$, [kg/s]	421.50	426.86
Mass flow of liquid in the column L_{mas} , [kg/s] (excluding anisole)	426.14	431.53
Anisole mass flow $L_{Anisole.mas}$, [kg/s]	679.15	720.00

A comparative analysis of the results of technological calculation with the available literature data showed their good convergence. Most of the calculated parameters coincide with the literature data with a maximum deviation of up to 5%.

In the initial data, a more accurate value of the natural concentration of HBC ^{10}B in the initial mixture was chosen, which leads to some difference between the calculated external flows of the column apparatus and the literature data [59].

Differences also appear when determining the reflux ratio and the number of theoretical separation stages, which in turn leads to a change in the working steam ratio and the values of the internal flows of the substance in the column apparatus.

In [59], the NTS was determined using the approximate Gilliland method, whereas in the described method, the calculation is carried out with greater accuracy by solving the systems of equations of the equilibrium curve and working lines in different sections of the column apparatus.

Therefore, this technique makes it possible to adequately calculate the technological parameters for column apparatus intended for the separation of boron isotopes by the method of chemical isotope exchange with thermal reversal of flows in the system of boron trifluoride and its molecular complex compound with anisole.

The initial data for the structural calculation are the initial data from Table 3.1 and the results of the technological calculation.

With the help of the described calculation method, the optimal structural characteristics of the column apparatus designed for the production of 2 and 4 tons of boron per year with an enrichment of 96 weight % according to ^{10}B given in Table 3.5.

Table 3.5 – The results of the structural calculation of the column apparatus designed for the separation of boron isotopes

Name of parameters		2 t/year	4 t/year
Plate type		Sieve	Sieve
Plate construction		TS	TS
Plate column diameter, D , [m]		0.5	0.6
Diameter of the hole in the plate d_0 , [mm]		3	5
Pitch between holes t , [mm]		11	17
Distance between plates, h_i , [m]		0.3	0.2
Number of actual separation stages		411	423
Height of the plates column, H , [M]		123.3	84.6
Total hydraulic resistance, ΔP [Pa]	upper	418.0	441.7
	lower	405.7	427.3

Table 3.6 shows that column apparatus with a capacity of 2 and 4 tons / year for ^{10}B , enriched to 96 weight % have the same type of sieve plates. At the same time, they differ in the diameter and height of the column apparatus, the main structural characteristics of the trays.

It is difficult to verify the method of structural calculation due to the lack of data on the characteristics of the contact devices of industrial column apparatuses in the literature.

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM11	Сухарю Павлу Андреевичу

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

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта – не более 300000 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 146958 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент для города Томска равен 1,3. Премимальный коэффициент равен 0,3.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды- 30,2%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	1. Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; 2. SWOT-анализ.
2. Разработка устава научно-технического проекта	1. Цели и результат проекта; 2. Организационная структура проекта; 3. Ограничения и допущения проекта.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	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.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	1. Определение интегрального финансового показателя разработки; 2. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3. Определение интегрального показателя эффективности; 4. Оценка сравнительной эффективности НИ.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка 2. Оценка конкурентоспособности технических решений 3. Матрица SWOT 4. Иерархическая структура работ 5. Диаграмма Ганта
--

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM11	Сухарь Павел Андреевич		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является определение экономической целесообразности и перспективности создания установки по разделению изотопов бора методом химического изотопного обмена с термическим обращением потоков с использованием системы BF_3 -анизол. Расчет технологических параметров и конструкционных характеристик проектируемого колонного аппарата производится с помощью созданных методик на ПЭВМ в программной среде PTC MathCad Prime.

В данном разделе для обеспечения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- планирование и организация научно-исследовательских работ;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Данная научно-исследовательская работа направлена на создание методики расчета колонных аппаратов и определение с ее помощью с

оптимальных технологических и конструкционных параметров колонного аппарата для производства высокообогащенных изотопов бора.

Целевым рынком данного исследования будут являться предприятия, где используются колонные аппараты и каскады колонн для разделения изотопов легких элементов, а также веществ с близкими физико-химическими свойствами. К таким предприятиям относятся подразделения государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (АО «ПО ЭХЗ», ПАО «НЗХК», АО «СХК»), нефтеперерабатывающие предприятия России (ПАО «Газпром», ООО «Сибур»), научные университеты (РХТУ им. Д.И. Менделеева, АО «ВНИИНМ»).

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности создания установки по производству высокообогащенных изотопов бора. Результаты сегментирования представлены в рисунке 4.1.

		Параметры колонного аппарата, предназначенного для производства высокообогащенных изотопов бора			
		Атомная промышленность	Нефтяная и химическая промышленность	Научная отрасль	Экспорт
Потребность	Сильная				
	Слабая				

Рисунок 4.1. Карта сегментирования рынка услуг по использованию установки по производству высокообогащенных изотопов бора

В результате построения и анализа карты сегментирования (рисунок 4.1) повышенный спрос на результаты исследований выявлен у предприятий атомной промышленности и научных организаций, развивающих направление

разделения изотопов легких элементов и веществ с близкими физико-химическими свойствами.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации. Определены следующие технические критерии оценки:

- производительность установки – временные затраты на производство заданного количества продукции;
- качество получаемой продукции – наличие побочных примесей в продукции;
- удобство и простота эксплуатации – простота доставки необходимых исходных веществ для ведения процесса получения продукции;
- надежность – средняя продолжительность безаварийного и бесперебойного режима работы;
- ремонтпригодность – заложенное в технической документации время эксплуатации основных деталей и их ремонтпригодность;

Помимо технических критериев оценки ресурсоэффективности определены также и экономические критерии оценки:

- конкурентоспособность;
- затраты на строительство – оценка финансовых затрат на реализацию проекта;

- экономичность – сокращение материальных и энергетических затрат на эксплуатацию установки;
- уровень возможности вхождения на рынок – стратегия роста сбыта установок;
- финансирование научной разработки – поддержка государством или инвесторами.

В таблице 4.1 приведена оценочная карта сравнения конкурентных технических решений. Проведено сравнение спроектированной установки по производству изотопов бора с имеющимися на рынке конкурентами:

- в национальном центре высоких технологий Грузии (г. Тбилиси) действует промышленная установка по производству высокообогащенных изотопов бора методом химического изотопного обмена с термическим обращением потоков с использованием системы BF_3 -анизол;
- в компании EaglePicher Technologies (США) высокообогащённые изотопы бора нарабатывают с помощью промышленной установки с использованием технологии химического изотопного обмена в системе BF_3 -диметиловый эфир.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. 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;

В оценочной карте для проведения сравнения выбрано три варианта технических решений проблемы производства изотопов бора:

вариант 1 – установка, спроектированная в результате проведенных исследований;

вариант 2 – установка, размещенная в национальном центре высоких технологий Грузии (г. Тбилиси);

вариант 3 – установка, компании EaglePicher Technologies (США).

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 1	Var. 2	Var. 3
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Производительность установки	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
Качество продукции	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
Удобство и простота эксплуатации	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
Надежность	0,2	4	3	4	0,8	0,6	0,8
Ремонтопригодность	0,05	5	2	1	0,25	0,1	0,05
Стабильность работы	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,15
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность	0,1	4	3	2	0,4	0,3	0,2
Затраты на строительство	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
Экономичность	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
Финансирование научной разработки	0,1	5	2	1	0,5	0,2	0,1
Вероятность освоения рынка	0,05	5	1	1	0,25	0,05	0,05
Итого	1	51	31	30	4,45	2,80	2,85

Полученные данные в таблице 4.1 позволяют говорить о том, что исследование является эффективным, так как обеспечивает приемлемое качество результатов. Дальнейшее инвестирование данной разработки можно считать целесообразными.

4.1.3 SWOT-анализ

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

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Применение современных подходов в расчете колонного аппарата.</p> <p>С2. Актуальность проекта – ежегодное увеличение спроса на продукцию.</p> <p>С3. Наличие квалифицированного персонала, имеющего опыт работы в данной области.</p> <p>С4. Экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>С5. Отсутствие в РФ действующих предприятий по промышленному производству изотопов бора.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Необходимость больших капитальных и эксплуатационных затрат.</p> <p>Сл2. Необходимость развития широкой логистической сети по производству и подаче исходного сырья.</p> <p>Сл3. Ненадежность, разработанных методик расчета, при проведении расчетов для малоизученных веществ.</p> <p>Сл4. Необходимость переработки большого количества токсичных отходов.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Усовершенствование методик расчета технологических и конструкционных параметров колонного аппарата.</p> <p>В2. Возможность проведения исследований.</p> <p>В3. Дополнительный спрос на результаты исследований.</p> <p>В4. Использование научно-исследовательских достижений ТПУ.</p> <p>В5. Принятая в РФ политика импортонезависимости</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>1. Используемые в методике расчета подходы, а также опыт разработчиков и ТПУ, позволяют быстро вносить любые изменения в методику, тем самым поддерживая актуальность и конкурентоспособность результатов расчета.</p> <p>2. Полученные результаты исследований технологических режимов процесса и расчетов оптимальных параметров могут быть применимы при создании других установок по разделению изотопов легких элементов физико-химическими методами.</p> <p>3. Отсутствие в РФ действующих предприятий по промышленному производству изотопов бора и принятая политика импортонезависимости приводит к появлению дополнительного спроса и финансирования разработок.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Проведение большого числа исследований и их дальнейшая реализация на предприятиях позволяет вносить обновления в имеющиеся методики расчета, тем самым увеличивая их надежность и снижая необходимые капитальные и эксплуатационные затраты.</p> <p>2. Научно-исследовательские достижения ТПУ позволяют постоянно получать информацию о современных конструкциях колонн.</p> <p>3. Повышенный спрос на продукцию высокообогащенных изотопов бора привлекает лучших ученых и специалистов для решения проблем эффективного производства и транспортировки исходного сырья, а также вопроса переработки отходов производства.</p>

Продолжение таблицы 4.2

<p>Угрозы: У1. Развитая конкуренция с другими предприятиями и научными институтами. У2. Разработка нового способа производства высокообогащенных изотопов бора.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: 1. Применение современных подходов в расчетах, а также имеющегося опыта проектирования приводит к созданию конкурентоспособных установок для эффективного выполнения поставленных задач.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: 1. Несовершенство расчетных методик можно решить с помощью их оптимизации и модернизации. 2. Проектирование более востребованной установки с возможностью получения побочных продуктов из отходов производства.</p>
--	---	---

В таблице 4.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

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

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 «-».

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент трудности и проблемы, с которыми так или иначе может столкнуться данный исследовательский проект можно будет решить за счет имеющихся сильных сторон и возможностей.

4.2. Инициация 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 4.4 – 4.7.

Таблица 4.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
ГК «Росатом» (АО «ПО ЭХЗ», ПАО «НЗХК», АО «СХК»)	Использование рассчитанных оптимальных технологических и конструкционных параметров колонного аппарата, для организации промышленного производства изотопов бора.
НИИ (РХТУ им. Д.И. Менделеева, АО «ВНИИНМ»)	Использование разработанной методики расчета технологических и конструкционных параметров колонного аппарата для разделения изотопов легких элементов.
Частные инвесторы	Получение максимальной доходности в зависимости от вложений

Информация о целях и результатах проекта приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Проведение расчета по созданной методике, оптимальных технологических и конструкционных параметров колонного аппарата, предназначенного для промышленного производства изотопов бора
Ожидаемые результаты проекта:	Создана методика расчета колонного аппарата. Получены оптимальные значения технологических и конструкционных параметров.
Критерии приемки результата проекта:	Созданная методика должна включать в себя расчет технологических и конструкционных параметров.
Требования к результату проекта:	Полученные результаты параметров колонных аппаратов должны быть верифицированы на данных с зарубежных установок.

Таблица 4.6– Рабочая группа проекта

ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции
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.
Сухарь П.А., 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 4.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
1. Бюджет проекта:	Не должен превышать 300 000 руб.
1.1 Источник финансирования	Средства ФГАОУ ВО НИ ТПУ.
2. Сроки проекта:	15.02.2023 – 20.05.2023
2.1 Дата утверждения задания на выполнение исследований	Задание на выполнение исследований должно быть утверждено к 15.02.2023.
2.2 Дата завершения проекта	Работа должна быть выполнена к 20.05.2023.
3. Прочие ограничения и допущения	Ограничения на время бесплатного использования учебной версии программной среды РТС MathCad Prime. Ограничение рабочего времени участников проекта (руководителя и исполнителя).

4.3. Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1. Иерархическая структура работ проекта

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

В данном разделе составляется полный перечень проводимых работ, в рамках проведения научного исследования, определяются их исполнители и рациональная продолжительность.

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. ИСР приведена на рисунке 4.2.

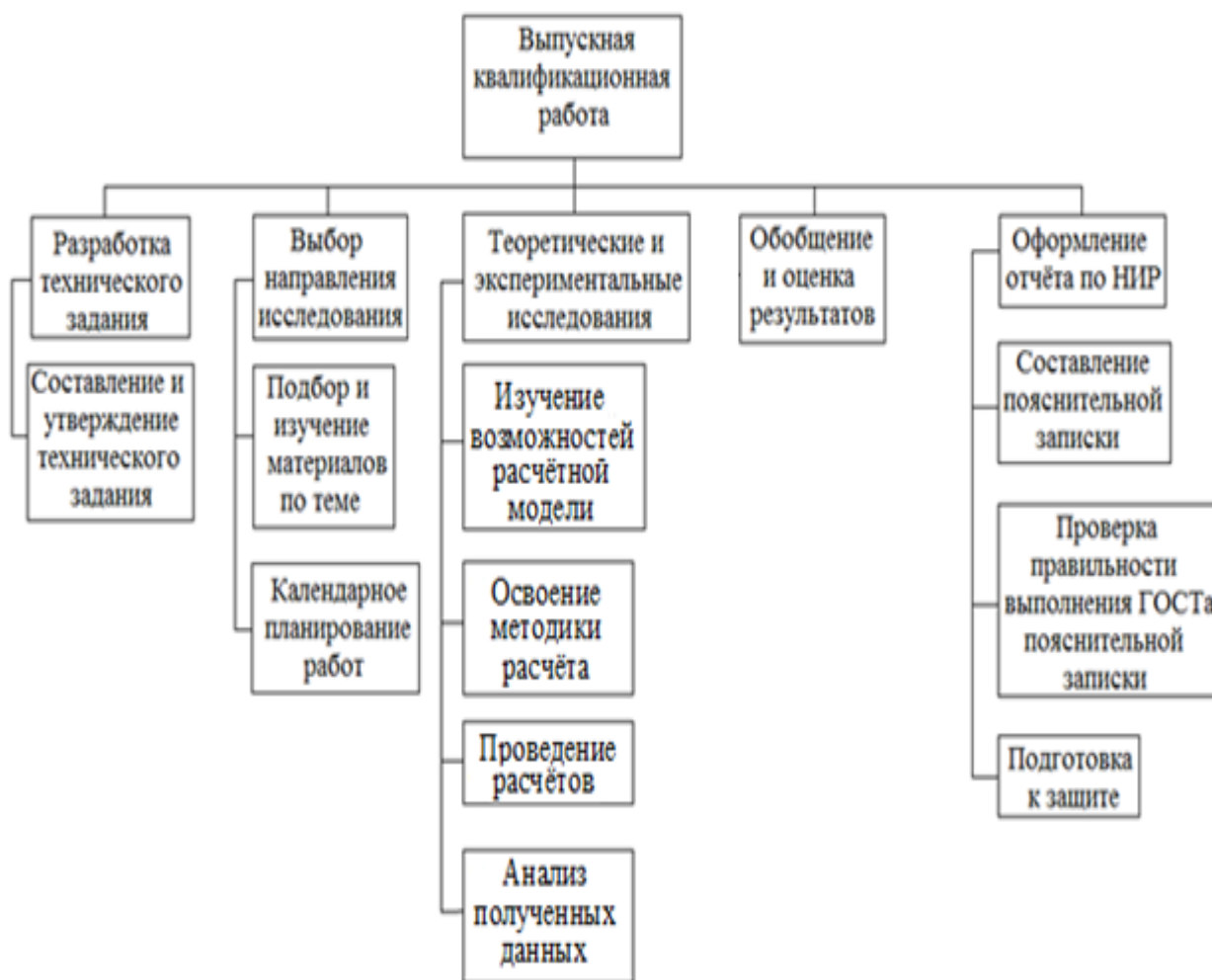


Рисунок 4.2 – Иерархическая структура работ

4.3.2. Контрольные события проекта

Перечень основных этапов их содержание и распределение среди участников представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень ключевых этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работ	Содержание работ	Состав участников
Разработка ТЗ	1	Составление и утверждение темы дипломной работы	Руководитель, исполнитель
	2	Анализ актуальности темы	Руководитель, исполнитель
Выбор направления исследований	3	Поиск и изучение материала по теме	Исполнитель
	4	Выбор направления исследования	Руководитель, исполнитель
	5	Календарное планирование работ	Руководитель, исполнитель
	6	Подбор нормативных документов	Руководитель, исполнитель
	7	Изучение расчетных методик	Исполнитель
Теоретические и экспериментальные исследования	8	Создание методики и верификация данных, полученных в результате пробного расчета	Руководитель, исполнитель
Обобщение и оценка результатов	9	Анализ результатов	Руководитель, исполнитель
	10	Заключение	Исполнитель
	11	Оформление пояснительной записки	Исполнитель
	12	Подготовка к защите	Исполнитель

4.3.3 Определение трудоемкости выполнения работ

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

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{\min\ i} + 2t_{\max\ i}}{5}, \quad (4.2)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дни.; $t_{\min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i – ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.; $t_{\max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i – ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i} \quad (4.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.; $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.; $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.3.4 Разработка графика проведения научного исследования

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

$$T_{ки} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (4.4)$$

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \quad (4.5)$$

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

Все рассчитанные значения представлены в таблице 4.9. В таблице 4.9 используются следующие сокращения: Р – руководитель, И – исполнитель.

Таблица 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни		Р	И	Р	И
	Р	И	Р	И	Р	И				
Составление и утверждение темы дипломной работы	2	2	4	5	2,8	3,2	1,4	1,6	3	3
Анализ актуальности темы	2	3	3	5	3,8	2,4	1,2	1,9	2	3
Поиск и изучение материала по теме	-	6	-	10	-	7,6	-	7,6	-	12
Выбор направления исследования	2	3	4	5	2,8	3,8	1,4	1,9	3	3
Календарное планирование работ	2	2	3	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
Подбор нормативных документов	2	4	3	6	2,4	4,8	1,2	2,4	2	4
Изучение расчетных методик	-	7	-	15	-	10,2	-	10,2	-	16
Создание методики и верификация данных	15	20	20	25	17	22	8,5	11	13	17
Анализ результатов	2	10	5	20	3,2	14	1,6	7	3	11
Заключение	-	2	-	5	-	3,2	-	3,2	-	5
Оформление пояснительной записки	-	15	-	18	-	16,2	-	16,2	-	24
Подготовка к защите	-	5	-	8	-	6,2	-	6,2	-	10
Общее количество дней	27	79	42	125	34,4	96	16,5	70,4	28	110

На основе полученной таблицы построена диаграмма Ганта, представленная рисунке 4.3.

№ работ	Вид работ	Участники	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение темы дипломной работы	Руководитель	8	■													
2	Анализ актуальности темы	Руководитель, исполнитель	3		■												
3	Поиск и изучение материала по теме	Руководитель, исполнитель	5		■	■											
4	Выбор направления исследования	Руководитель	8			■	■										
5	Календарное планирование работ	Руководитель	3				■										
6	Подбор нормативных документов	Руководитель, исполнитель	5				■	■									
7	Изучение расчетных методик	Исполнитель	13					■	■	■							
8	Создание методики и ее верификация	Руководитель, исполнитель	12							■	■	■					
9	Анализ результатов	Руководитель, исполнитель	6									■	■				
10	Заключение	Исполнитель	13												■		
11	Оформление пояснительной записки	Исполнитель	19													■	■
12	Подготовка к защите	Исполнитель	15														■

■ – исполнитель ▨ – руководитель

Рисунок 4.3 – Календарный план-график проведения научного исследования

4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы

4.4.1 Расчет материальных затрат

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расх\ i} \quad (4.6)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{расх\ i}$ – количество материальных ресурсов i -ого вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); C_i – цена приобретения единицы i -ого вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.); k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов. Примем k_T равным 0,2.

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 4.10.

Затраты на электроэнергию для работы ПЭВМ рассчитываются по формуле:

$$C_M = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 5,8 \cdot 0,5 \cdot 800 = 2320 \quad (4.7)$$

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

Таблица 4.10 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электроэнергия		400 кВт·ч	5,8	2320
Программное обеспечение: PTC Mathcad Prime		4 месяца	0	0
Всего за материалы				2320
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого по статье C_M				2320

Затраты на электроэнергию для двух ПЭВМ составили 2320 рубля.

4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ

На статью "Спецоборудование" для разработки и экспериментальных работ относятся затраты на приобретение, изготовление, аренду или амортизационные отчисления специальных приборов, устройств и т.д.

Сумма амортизационных отчислений рассчитывается по следующим формулам:

$$A_n = \frac{1}{N}, \quad (4.8)$$

$$A_z = C_{осн} \cdot A_n, \quad (4.9)$$

$$A_m = \frac{A_z}{12}, \quad (4.10)$$

$$A = A_m \cdot n \quad (4.11)$$

где A_n – норма амортизации; N – срок полезного использования; A_2 – годовые амортизационные отчисления; $C_{осн}$ – стоимость основного средства; A_m – ежемесячные амортизационные отчисления; A – затраты на амортизацию в проекте; n – количество месяцев использования основного средства или нематериального актива;

Используемое оборудование, его стоимость и амортизация приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.	Затраты на амортизацию, руб.
1	Персональный компьютер	2	3	45000	90000	10000
Итого:					90000 руб.	10000

В данном разделе проведен расчёт амортизации оборудования. Амортизация для персонального компьютера, с учётом того, что срок полезного использования 3 года составила – 0,33, а общая сумма амортизационных отчислений 10000 рублей.

4.4.3 Затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования

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

$$C_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.12)$$

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

Основную заработную плату руководителя НИР можно рассчитать по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} + T_{раб} \quad (4.13)$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.;
 $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником 28 и 110 для руководителя и исполнителя соответственно, раб.дн.

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{доп} = Z_{осн} \cdot \kappa_{доп} \quad (4.14)$$

где $\kappa_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты, равный 12,5%.

Среднедневная заработная плата работника рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (4.15)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года 10,1 и 10,4 для руководителя и исполнителя соответственно, мес. F_d – расчетный годовой фонд рабочего времени персонала в рабочих днях представлен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Расчетный годовой фонд рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные/праздничные)	66	118
Потери рабочего времени (отпуск/ невыходы по болезни)	56	28
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	219

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_M = Z_{TC} + K_{ПР} \cdot K_P \quad (4.16)$$

где Z_{TC} – заработная плата по тарифной ставке 35000 и 15000 для руководителя и исполнителя соответственно, руб.; $K_{ПР}$ – премиальный коэффициент, равный 20% от Z_{TC} ; K_P – районный коэффициент, равный 1,3 для Томска;

Результаты расчета заработной платы представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Результаты расчета заработной платы исполнителей

Работники	Z_{TC} , руб.	$K_{ПР}$	K_P	Z_M , руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{раб}$, раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.	$C_{зп}$, руб.
Руководитель	35000	7000	1,3	44100	1825	28	51100	6387	57487
Исполнитель	15000	3000		18900	723	110	79530	9941	89471
Итого	50000	10000		63000	2547	138	130630	16328	146958

4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot C_{зп} \quad (4.17)$$

где $k_{внеб} = 30,2\%$ – 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:

$$C_{внеб} = 0,302 \cdot 57487 = 17362 \text{ руб.}$$

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

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 89471 = 27021 \text{ руб.}$$

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 17362 руб., а для исполнителя 27021 рубля.

4.4.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (C_{\text{зн}} + A + C_{\text{внеб}}) \quad (4.18)$$

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:

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot 146958 = 23514 \text{ руб.}$$

4.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в

качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

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

Таблица 4.14 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	2320
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	10000
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	146958
4. Отчисления во внебюджетные фонды	44383
5. Накладные расходы	23514
6. Бюджет затрат НТИ	227175

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

4.5.1 Определение финансовой и ресурсной эффективности

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

Определения финансовой эффективности и ресурсоэффективности проводится для трех вариантов реализации установки по получению высокообогащенных изотопов бора:

вариант 1 – установка, спроектированная в результате проведенных исследований;

вариант 2 – установка, размещенная в национальном центре высоких технологий Грузии (г. Тбилиси);

вариант 3 – установка, компании EaglePicher Technologies (США).

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по формуле:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_i}{\Phi_{\max}}, \quad (4.19)$$

где Φ_i – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения НТИ (в т.ч. аналоги).

$$I_{\phi}^{\text{Вар.1}} = \frac{\Phi_{\text{Вар.1}}}{\Phi_{\max}} = \frac{227175}{300000} = 0,757;$$

$$I_{\phi}^{\text{Вар.2}} = \frac{\Phi_{\text{Вар.2}}}{\Phi_{\max}} = \frac{270000}{300000} = 0,9;$$

$$I_{\phi}^{\text{Вар.3}} = \frac{\Phi_{\text{Вар.3}}}{\Phi_{\max}} = \frac{300000}{300000} = 1$$

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

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.20)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1.Повышение производительности	0,1	4	4	3
2.Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4	4
3. Стабильность работы	0,15	5	4	3
4. Экономичность	0,1	4	2	3
5. Надежность	0,25	4	3	4
6. Время наработки продукции	0,25	5	2	3
I_p		4,55	3,05	3,40

$$I_{\text{Вар.1}} = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 = 4,55 ;$$

$$I_{\text{Вар.2}} = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,1 \cdot 2 + 0,25 \cdot 3 + 0,25 \cdot 2 = 3,05 ;$$

$$I_{\text{Вар.3}} = 0,1 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 + 0,25 \cdot 4 + 0,25 \cdot 3 = 3,40$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{\text{финр}}^{\text{Вар.1}}$) и аналогов ($I_{\text{финр}}^{\text{Вар.2}}$, $I_{\text{финр}}^{\text{Вар.3}}$) определяется на основании

интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального

финансового показателя по формулам $I_{финр}^{Вар.1} = \frac{I_{Вар.1}}{I_{\phi}^{Вар.1}}$, $I_{финр}^{Вар.2} = \frac{I_{Вар.2}}{I_{\phi}^{Вар.2}}$, $I_{финр}^{Вар.3} = \frac{I_{Вар.3}}{I_{\phi}^{Вар.3}}$:

$$I_{финр}^{Вар.1} = \frac{I_{Вар.1}}{I_{\phi}^{Вар.1}} = \frac{4,55}{0,757} = 6,01;$$

$$I_{финр}^{Вар.2} = \frac{I_{Вар.2}}{I_{\phi}^{Вар.2}} = \frac{3,05}{0,9} = 3,39;$$

$$I_{финр}^{Вар.3} = \frac{I_{Вар.3}}{I_{\phi}^{Вар.3}} = \frac{3,40}{1} = 3,40.$$

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

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_p} \quad (4.21)$$

Таблица 4.16. Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки и аналогов	4,55	3,05	3,40
Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки и аналога	6,01	3,39	3,40
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,32	1,11	1

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 предложенными конкурентами.

4.6 Выводы по разделу

1. Оценочная карта сравнения технических решений конкурентов показала, что проводимые в работе исследования по созданию методики и рассчитанной с помощью нее установки являются оптимальными для использования в практических целях.

2. В ходе планирования научно-исследовательских работ определён перечень работ, выполняемый рабочей группой. В данном случае рабочая группа состоит из двух человек: руководитель и исполнитель. Согласно составленному плану работ длительность трудовой занятости в рабочих днях сотрудников исследовательского проекта составила в сумме 138 дней, занятость руководителя и исполнителя 28 и 110 дней соответственно.

3. Составлен бюджет выполнения научно-исследовательских работ, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 227175 рублей.

4. Эффективность проекта подтверждается наибольшими значениями интегрального финансового показателя – 0,757, интегрального показателя эффективности – 4,55, сравнительной эффективности – 1,32 по отношению к аналогам.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM11	Сухарю Павлу Андреевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	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: колонный аппарат для разделения изотопов бора методом химического изотопного обмена с термическим обращением потоков. Область применения: атомная промышленность.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. – СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: <ul style="list-style-type: none"> – микроклимат; – шум и вибрация; – освещенность; – электробезопасность; – пожаро- и взрывоопасность.
3. Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях:	Возможные аварийные и чрезвычайные ситуации: <ul style="list-style-type: none"> – травматизация при падении с высоты собственного роста; – удар электрическим током; – пожар.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Юрий Владимирович	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM11	Сухарь Павел Андреевич		

5 Социальная ответственность

В соответствии с поставленной целью результатом магистерской диссертации является рассчитанный, с помощью созданной методики расчета, перечень технологических параметров и конструкционных характеристик колонного аппарата, предназначенного для разделения изотопов бора методом химического изотопного обмена с термическим обращением потоков в системе трифторид бора и его молекулярного комплексного соединения с анизолом.

Адаптация и совершенствование существующих методик, проведение расчетов с целью обоснования оптимальных параметров исследуемого процесса и основных размеров и характеристик проектируемого аппарата, а также анализ полученных результатов проводились в аудитории № 246 отделения ядерного-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий 10 корпуса ФГАОУ ВО НИ ТПУ.

В данном разделе рассмотрены вредные и опасные факторы производственной среды, оказывающие влияние на операторов ЭВМ, определены способы обеспечения защиты от них в соответствии с требованиями действующей нормативной документации.

5.1 Выявление и анализ опасных и вредных производственных факторов

В соответствии с [93] определены основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы, которые возникают при выполнении данной работы:

- микроклимат [94, 95];
- шум и вибрация [96, 97];
- освещенность [98];
- электробезопасность [99, 100];
- пожаро- и взрывоопасность [101, 102]

5.1.1 Микроклимат

Основными показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются: температура воздуха; температура поверхностей; относительная влажность воздуха; скорость движения воздуха; интенсивность теплового облучения.

ЭВМ, вспомогательная техника, а также приборы освещения в процессе работы выделяют тепло. Высокая температура способствует быстрой утомляемости и перегреву организма при нахождении в непосредственной близости от источников тепла. Влажность также оказывает значительное влияние на терморегуляцию человека, так низкая влажность может привести к высыханию кожи, слизистых оболочек и общему обезвоживанию организма, а высокая – к повышенной отдаче тепла и возможному перегреву организма [94].

Для поддержания данных санитарных норм необходимо иметь местный кондиционер установки полного кондиционирования воздуха, обеспечивающий постоянство температуры, относительной влажности, скорости движения и чистоты воздуха. Необходима система центрального водяного отопления, обеспечивающая заданный уровень температуры в зимний период [94].

В таблице 5.1 приведены оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах, которые установлены санитарными нормами для различных категорий работ в разные периоды года. При работе за ЭВМ категория работ является легкой (Ia), поскольку не возникает систематических физических нагрузок [94].

Таблица 5.1 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22-24	21-25	60-40	не более 0,1
Теплый	Ia (до 139)	23-25	22-26	60-40	не более 0,1

В аудитории № 246 отделения ядерного-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий 10 корпуса ФГАОУ ВО НИ ТПУ выполняются нормативы по микроклимату.

Для поддержания санитарных норм достаточно иметь естественную неорганизованную вентиляцию помещения и местный кондиционер установки полного кондиционирования воздуха, обеспечивающий постоянство температуры, относительной влажности, скорости движения и чистоты воздуха [95].

Для расчёта производительности воздухообмена вентилятора в аудитории № 246 отделения ядерного-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий 10 корпуса ФГАОУ ВО НИ ТПУ воспользуемся формулой:

$$W = V \cdot K, \quad (5.1)$$

где $V = 115 \text{ м}^3$; кратность воздухообмена в помещении $K = 3 \text{ ч}^{-1}$, что соответствует норме по [95].

Подставляя известные значения в формулу, получим $W = 345 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$. Исходя из имеющихся критерий, подойдёт вихревая воздуходувка Becker SV 700/2 5.5, с максимальной производительностью $370 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ [103].

5.1.2 Шум и вибрация

Шум ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

Для оценивания шумовой обстановки допускается использовать числовую характеристику, называемую уровнем звука (измеряется в дБ). Допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе

с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях с шумным оборудованием, составляет 75 дБ [96].

За рабочей поверхностью уровень шума от ЭВМ достигает 30 дБ, что находится в пределах нормы. Уровень шума от вихревой воздуходувки составляет 53 дБ, что соответствует нормам [97].

5.1.3 Освещенность

Освещение рабочего места – важнейший фактор создания нормальных условий труда. Освещению следует уделять особое внимание, так как при работе наибольшее напряжение получают глаза. Недостаточная освещенность рабочей зоны также считается одним из факторов, влияющих на работоспособность человека. Для промышленных предприятий оптимальная освещенность территории и помещений является важной и непростой технической задачей, решение которой обеспечивает нормальные гигиенические условия для работающего персонала. Правильно подобранные источники света и их проектирование создают условия для производственного труда, корректности выполнения технологических операций, соблюдения правил и техники безопасности.

Освещение делится на естественное, искусственное и совмещенное. Совмещенное сочетает оба вида освещения.

Причинами недостаточности естественного и искусственного освещений являются отдаленность рабочего места от источников освещения, недостаточная мощность и некачественность источников освещения, неподходящие погодные факторы или время суток. Недостаточность освещения снижает производительность труда, увеличивает утомляемость и количество допускаемых ошибок, а также может привести к появлению профессиональных болезней зрения [98].

Необходимая освещенность на рабочем месте достигается за счет искусственного освещения люминесцентными лампами. Посчитаем необходимое число светильников по формуле:

$$n = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot K}{F \cdot U \cdot m}, \quad (5.2)$$

где E – нормированная освещенность, $E = 300$ лк;

S – площадь помещения, $S = 41,1$ м²;

Z – поправочный коэффициент светильника, $Z = 1,2$;

K – коэффициент запаса, учитывающий снижение освещенности при эксплуатации, $K = 1,2$;

F – световой поток одной лампы, ЛД 40, $F = 2130$ лк;

U – коэффициент использования, $U = 0,55$;

m – число ламп в светильнике, $m = 2$.

Подставив значения получаем $n = 7,58$ шт. Но так как необходимо целое число, то округлив, получаем 8 ламп, что соответствует количеству ламп в аудитории № 246 отделения ядерного-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий 10 корпуса ФГАОУ ВО НИ ТПУ.

5.1.4 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Опасность поражения электрическим током существует в следующих случаях [99]:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во

время ремонта;

- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает тепловое, химическое и биологическое воздействие.

Тепловое (термическое) действие проявляется в виде ожогов участка кожи, перегрева различных органов, а также возникающих в результате перегрева разрывов кровеносных сосудов и нервных волокон.

Химическое (электролитическое) действие ведет к электролизу крови и других содержащихся в организме человека растворов, что приводит к изменению их физико-химических составов, а значит, и к нарушению нормального функционирования организма

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклччение в корпус токоведущих частей) [100].

Помещение, в котором проходили работы, подходит под помещения 1 класса, в котором рабочие напряжения не превышают 1 000 В [99].

5.1.5 Электромагнитные поля

Основным вредным фактором при использовании ЭВМ является электромагнитное излучение от составляющих частей устройств. Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы.

Электромагнитные поля контролируют в следующих диапазонах: 50 Гц (промышленная частота) и от 30 кГц до 300 ГГц. Измерения проводят на рабочих местах пользователей стационарных и портативных персональных компьютеров. Контролируют следующие параметры: напряженность электрического и магнитного поля, напряженность электростатического поля.

Нормы предельно допустимых уровней (ПДУ) электромагнитного излучения, установленные в документе [96], показаны в таблицах 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2 – Предельно допустимые уровни электрических и магнитных полей промышленной частоты 50 Гц

№ п/п	Тип воздействия	Напряженность электрического поля, кВ/м	Индукция (напряженность магнитного поля), мкТл (А/м)
1	В жилых зданиях, детских, дошкольных, школьных, общеобразовательных учреждениях	0,5	5,0 (4,0)
2	В общественных зданиях	0,5	10,0 (8,0)
3	На территории жилой застройки	1,0	10,0 (8,0)

Таблица 5.3 – Предельно допустимые уровни ЭМП диапазона частот 30 кГц-300 ГГц

Диапазон частот	30-300 кГц	0,3-3 МГц	3-30 МГц	30-300 МГц	0,3-300 ГГц
Нормируемый параметр	Напряженность электрического поля, Е (В/м)				Плотность потока энергии, ППЭ (мкВт/см)
Предельно-допустимые уровни	25	15	10	3	10 25 для случаев облучения от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования

Персональный компьютер, находящийся в аудитории № 246 отделения ядерного-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий 10 корпуса ФГАОУ ВО НИ ТПУ, создает электромагнитное излучение частотой 130 Гц, что не контролируется [96].

5.1.6 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. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий [101].

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

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.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и

оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся следующие: установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [101]:

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

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководителю;
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры в соответствии с [102].

5.2 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная (аварийная) ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. Есть два вида чрезвычайных ситуаций:

- техногенная;
- природная.

К техногенным ЧС можно отнести пожары, взрывы, диверсии, выбросы ядовитых веществ. К природным ЧС относятся природные катаклизмы. Наиболее вероятной техногенной ЧС являются пожары.

К опасностям несчастного случая относится внезапный и неуправляемый источник энергии: двигающийся предмет, неуправляемое движение или энергия [104].

Рассмотрим возможные аварийные и чрезвычайные ситуации в аудитории № 246 отделения ядерного-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий 10 корпуса ФГАОУ ВО НИ ТПУ, а именно:

- падение с высоты собственного роста;
- удар электрическим током;
- возникновение пожара.

Мероприятия по предотвращению вышеуказанных аварийных и чрезвычайных ситуаций и мероприятия по ликвидации их последствий представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Аварийные и чрезвычайные ситуации, мероприятия по предотвращению аварийных и чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий аварийных и чрезвычайных ситуаций.

№	Аварийные (чрезвычайные) ситуации	Мероприятия по предотвращению аварийной и чрезвычайной ситуации	Мероприятия по ликвидации последствий аварийной и чрезвычайной ситуации
1	Травматизация при падении с высоты собственного роста	1. Содержание помещения в надлежащем порядке. 2. Ограничение рабочего пространства. 3. Своевременное проведение инструктажа.	1. Осмотреть или опросить пострадавшего; 2. если необходимо – вызвать скорую помощь – тел. 112; 3. остановить кровотечение, если оно имеется; 4. если есть подозрение, что у пострадавшего сломан позвоночник (резкая боль в позвоночнике при малейшем движении), необходимо обеспечить пострадавшему полный покой в положении лежа на спине до оказания квалифицированной медицинской помощи. 5. позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
2	Удар электрическим током	1. Заземление всех электроустановок. 2. Ограничение рабочего пространства. 3. Обеспечение недоступности токоведущих частей аппаратуры. 4. Своевременное проведение инструктажа.	1. Быстро освободить пострадавшего от действия электрического тока; 2. вызвать скорую помощь; 3. если пострадавший потерял сознание, но дыхание сохранилось, его следует удобно уложить, расстегнуть стесняющую одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой; 4. пострадавшему надо дать понюхать нашатырный спирт, сбрызнуть лицо водой, растереть и согреть тело; 5. при отсутствии дыхания нужно немедленно делать искусственное дыхание и массаж сердца. 6. позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
3	Пожар	1. Своевременное проведение инструктажа. 2. Установление средств автоматического пожаротушения в помещениях. 3. Установка датчиков дыма и огня. 4. Обеспечение путей эвакуации и поддержание их в надлежащем состоянии. 4. Контроль работы электроприборов.	1. Обесточить помещение, прекратить поступление воздуха; 2. немедленно сообщить о пожаре дежурному или на пост охраны; 3. по возможности принять меры по эвакуации людей, тушению пожара и спасению материальных ценностей. 4. позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;

В данном подразделе рассмотрены потенциальные аварийные ситуации, которые могут возникнуть при работе в аудитории № 246 отделения ядерного-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий 10 корпуса ФГАОУ ВО НИ ТПУ. Рассмотрены мероприятия по предотвращению и ликвидации последствий этих ситуаций согласно [104].

5.3 Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В разделе рассмотрены организационные вопросы обеспечения безопасности работников, выявлены возможные вредные и опасные факторы (микроклимат [94, 95], вибрация, шум [96, 97], освещение [98], электробезопасность [99, 100], пожаро- и взрывопасность [101, 102]), также проведен их анализ и обоснован ряд мероприятий по снижению их воздействия на исследователя.

Работа в штатном режиме в аудитории № 246 отделения ядерного-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий 10 корпуса ФГАОУ ВО НИ ТПУ не принесет вред работнику. Помещение отнесено к классу В по пожароопасности, к 1 категории по электробезопасности (до 1000 В).

Проанализированы возможные аварийные и чрезвычайные ситуации, описаны мероприятия по их предотвращению и ликвидации последствий. Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является возникновение пожара на рабочем месте вследствие возгорания оборудования.

Conclusions

1. Improvement of methods for calculating the technological parameters of the rectification process and the structural characteristics of column apparatus, allowing more accurate analytical determination of the operating reflux ratio and the number of separation stages, which leads to the abandonment of the use of graphical methods and the addition of empirical corrections to the number of stages in further calculations, reducing the time of calculations. Improved calculation methods are implemented using a block approach for describing algorithms in a software environment PTC MathCad Prime, that allows you to quickly upgrade each block of the algorithm.

2. The calculation methods are verified for the classical benzene-toluene system used in the oil industry, as well as for the boron trifluoride-anisole system. A good convergence of the calculation results with the literature data is shown, which makes it possible to consider the calculation method as universal. Verification of the structural calculation method for the separation of boron isotopes has not been carried out due to the lack of data on the characteristics of the contact devices of industrial column apparatuses in the literature.

3. The optimal technological parameters and design characteristics of column apparatuses designed for the production of 2 and 4 tons of boron per year with an enrichment of 96 weight % over ^{10}B . It is shown that column apparatuses with different capacities have the same type of sieve plates. At the same time, they have a diameter and height of column apparatuses that have strict design requirements for plates.

The results obtained can be used to implement an industrial plant for the separation of boron isotopes in JSC «Siberian Chemical Plant».

References

1. Golashvili T.V. Spravochnik nuklidov / T.V. Golashvili, V.P. CHEchev, S.A. Badikov; pod. red. T.V. Golashvili. – 4-e izdanie, pererabotano i dopolneno. – M.: Izdatel'skij dom MEI, 2011. – 462 p.
2. Izotopy bora: oficial'nyj sajt AO «PO EKHZ» – URL: <https://www.ecp.ru/activity/nuclear/iztps-bor>(date of the application 02.04.2023). – Text : electronic.
3. Polevoj A.S. Razdelenie i ispol'zovanie stabil'nyh izotopov bora / A.S. Polevoj // Itogi nauki i tekhniki. VINITI. Ser. Radiohimiya. YAdernaya tekhnologiya. – 1990. – 192 p.
4. Aston F. V. Mass-spektry i izotopy / F. V. Aston – M.: Per. s angl. – Inostrannoju literatury, 1948 – 299 p.
5. Sevryugova N.N. Bor / N.N. Sevryugova, O.V. Uvarov, N.M. ZHavoronkov // Bor.: Tr. Konf. Po himii bora i ego soedinenij. – M.: Goskhimizdat, 1958. – pp. 30-34.
6. Sevryugova N.N. ATOM BOR / N.N. Sevryugova, O.V. Uvarov, N.M. ZHavoronkov // Atomnaya energiya. – 1960. – Vol. 9, № 2. – pp. 110-125.
7. Palko A.A. Isotope Effects in Chemical Processes Based on a Symposium sponsored by a Division of Nuclear Chemistry and Technology at the 153rd Meeting of American Chemical Society/ A.A. Palko, J.S. Drury. – Miami Beach, Fla., April 11, 1967. // Washington: American Chemical Society., 1969. – pp. 119-147.
8. Gerstenberger H. Liquid-liquid-extraction for the enrichment of stable boron isotopes / H. Gerstenberger // Isotopenpraxis, 1974. – Vol. 10, № 8, – pp. 285-289.
9. Marschall H. R. Boron isotopes in the earth and planetary sciences / H.R. Marschall, G.L. Foster. – A short history and introduction // Boron Isotopes: The Fifth Element. – 2018. – pp. 1-11.

10. Shiuttse V. An Investigation of the Isotopic Constitution of Boron / V. Shiuttse // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1956. – Vol. 2, № 3. – pp. 486-490.
11. Glembotskii I.I. Fock Self-consistent Field for the Boron Atom in the Two-configuration Approximation / I.I. Glembotskii, V.V. Kibartas, A.P. Iutsis // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1956. – Vol. 2, № 13. – pp. 617-621.
12. Semenov G.M. Issledovaniya prirodnoj koncentracii izotopov bora / Semenov G.M., Zonov YU.A. // Zhurnal analiticheskoy himii – 1956. – Vol. 14, № 1. – pp. 137-138.
13. Panchenkov G.M. Prirodnaya koncentraciya izotopov / G.M. Panchenkov, V.D. Moiseev, YU.A. Lebedev // Zhurnal fizicheskoy himii. – 1961. – Vol. 65, № 10. – pp. 2348-2352.
14. Meija, J. Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report) / J. Meija, T.B. Coplen, M. Berglund [et al.] // Pure and Applied Chemistry. – 2016. – Vol. 88, № 3. – pp. 293–306. – DOI: 10.1515/pac-2015-0503
15. Risovannyj V.D. Bor v yadernoj tekhnike. 2e. pererab. i dop. / V.D. Risovannyj, A.V. Zaharov, E.P. Klochkov, T.M. Guseva. – Dimitrovgrad: OAO «GNC NIAR», 2011 – 668 p.
16. Groshev L.V. Atlas spektrov γ -lučej radiacionnogo zahvata teplovyh nejtronov. / L.V. Groshev, A.M. Demidov, V.N. Lucenko, V.I. Pelekhov. – M.: Atomizdat, 1958 – 199 p.
17. Davis E.A. The disintegration of B10 and F19 by fast neutrons / E.A. Davis, F. Gabbard, T.W. Bonner [et al.] // Nucl. Phys., 1966. – Vol. 27, № 4. – pp. 448-466. – DOI: 10.1016/0029-5582(61)90338-8
18. Ivanova T.A. Sečenie obrazovaniya tritiya pri vzaimodejstvii nejtronov s yadrami ^{10}V / T.A. Ivanova, I.P. Bondarenko, B.D. Kuz'minov [et al.] // ECHAYA 2013. – Vol. 10, # 4. – pp. 566-571.

19. Woelfe R. Measurement of $^{10}\text{V}(\text{n,t})^{2}\text{He}$ Reaction Cross Section in the Energy Range of 2.5 to 10.6 MeV Diffusion of Tritium in Boron Carbide / R. Woelfe [et al.] // *J. Radiochimica Acta.* – 1986. – Vol. 40. – pp. 113-116.
20. Qaim, S. M. Determination of (n, Charge Particle) Reaction Cross Section for FRT. Relevant Materials / S. M. Qaim, R. Wölfle, G. Stöcklin [et al.] // *Sonf. on Nuclear Data for Basic and Applied Science.* Santafe, 1985. – Vol. 1. – pp. 97-100.
21. Davis E.A. The Disintegration of ^{10}V and ^{19}F by Fast Neutrons / E.A. Davis, F. Gabbard, T.W. Bonner [et al.] // *Nucl. Phys.*, 1966. – Vol. 27. № 4. – pp. 448-466. SSYLKA 17
22. Lippincott E.P. Measurement of $^{10}\text{V}(\text{n}, \text{t})$ Cross Section in Fast Neutron Spectrum / E.P. Lippincott, A.L. Pitner, L.S. Kellogg. // *Transactions of American Nuclear Societ.* – 1973. – Vol. 17. – pp. 494-495.
23. Frye Jr.G. $^{10}\text{V}(\text{n}, \text{t}2\alpha)$ and $^{10}\text{V}(\text{n}, \text{dn}2\alpha)$ Reaction for 6-20 MeV Neutrons / Jr.G. Frye, J.H. Gammel // *Phys. Rev. D.* – 1956. – Vol. 103. – pp. 328-334.
24. Wyman M. E. (n, t) Cross Sections for ^{10}V , ^{11}V and ^9Ve / M. E. Wyman, E. M. Fryer, M. Thorpe // *Phys. Rev.* – 1958. – Vol. 112. – pp. 1264-1271.
25. Potapov S.P. O primenenii stabil'nyh izotopov bora. / S.P. Potapov // *Atomnaya energiya.* – 1961. – Vol. 10, № 3. – pp. 244-251.
26. Sealock R. M. $^7\text{Li}(\alpha, \text{n})^{10}\text{B}$ differential cross-section measurements from threshold to $E\alpha= 5.1$ MeV / R.M. Sealock, W. Hsiao-Yuan // *Nuclear Physics A.* – 1981. – Vol. 357, №. 2. – pp. 279-292. – DOI: 10.1016/0375-9474(81)90222-0
27. Pogloshchayushchie materialy dlya regulirovaniya yadernyh reaktorov: Per. s angl. / edited by B.G. Arabeya i V.V. CHEkunova. M.: Atomizdat, 1965 – 450 p.
28. Murgatroyd R.A. Technology and assessment of neutron absorbing materials / Murgatroyd R.A., Kelly B.T. // *Atomic Energy Rev.* – 1977. – Vol. 15, № 1. – pp. 3-74.

29. Gladshev A.M. YAderno-fizicheskie, himicheskie i mekhanicheskie svojstva karbida bora: Obzor. FEI – 0203. M.: CNIIatominform, 1985 – 50 p.
30. Karumidze G.S. Nejtronopoglashchayushchie materialy na osnove kremniya i karbida bora dlya organov regulirovaniya rektora. / G.S. Karumidze // Atomnaya energiya. – 1997. – Vol. 82, № 5. – pp. 386-387.
31. Blum J. M. Separation of boron isotopes / J.M. Blum, S. Marteau // Energie Nucleaire (Paris). – 1972. – Vol. 14, №. 1. – pp. 33-37.
32. J.H. Shafter, W.R. Gtimes, G.M. Watson // Energie Nucleaire (Paris). – 1962. – Vol. 12, №. 3. – pp. 337-340.
33. Wakabayashi H. Radiation field for fission neutron enhanced boron neutron capture therapy employing fast neutron source reactor “YAYOI” / H. Wakabayashi, K. Yoshii, N. Sasuga [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1982. – Vol. 19, № 7. – pp. 555 562. – DOI: 10.1080/18811248.1982.9734182.
34. R.A. Spryshkova // Vtoroj Mezhdunarodnyj simpozium stran-chlenov SEV po stabil'nym izotopam (Tbilisi, 27-30 noyabrya 1989 g.). Tezis doklada – Tbilisi: Ministerstvo atomnoj energetiki i promyshlennosti SSSR, 1989. – pp. 13-15.
35. V.A. Bratcev, O.R. Sagitulin, R.A. Spryshkova [et al.] // Vtoroj Mezhdunarodnyj simpozium stran-chlenov SEV po stabil'nym izotopam (Tbilisi, 27-30 noyabrya 1989 g.). Tezis doklada – Tbilisi: Ministerstvo atomnoj energetiki i promyshlennosti SSSR, 1989. – pp. 46-47.
36. Taskaev S.YU. Bor-nejtronozahvatnaya terapiya / C.YU. Taskaev, V.V. Kanygin. – Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2016 – 216 p.
37. Locher G.L. Biological effects and therapeutic possibilities of neutrons / G.L. Locher // Am J Roentgenol. –1936. –Vol. 36, № 1. – pp. 1-13.
38. Chadwick J. The existence of a neutron / J. Chadwick // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. – 1932. – Vol. 136, № 830 – pp. 692-708.

39. Andreev B.M. Razdelenie izotopov biogennyh elementov v dvuhfaznyh sistemah. / Andreev B.M., Magomedbekov E.P., Rajtman A.A. [et al.]. – Edited by PhD, professor B.M. Andreev. M.: IzdaAT, 2003 – 376 p.
40. Sevryugova N.N. Razdelenie stabil'nyh izotopov bora. / N.N. Sevryugova, O.V. Uvarov, N.M. ZHavoronkov // Atomnaya energiya. – 1960 – Vol. 9, № 2. – P. 110.
41. Katal'nikov S.G. Sovremennoe sostoyanie rabot po razdeleniyu izotopov bora. / S.G. Katal'nikov, V.S. Nedzveckij, V.E. Pisarev. // Isotopenpraxis. – 1968. – Vol. 4, № 9. – pp. 341 – 352.
42. Nettley P.T. The production of ^{10}B by low-temperature distillation of boron trifluoride / Nettley P.T., Cartwright D.K., Kronberger H. // Proc. of the Intern. Symp. on isotope separation. Amsterdam: North Holl. Pub. Co. – 1958. – pp. 385-407.
43. Myulenfordt YU.K., Zivert G.G., Gagua T.A. // Poluchenie izotopov. Moshchnye gamma-ustanovki. Radiometriya i dozimetriya. Tr. Vses. Nauchnotekhn. konf. po primeneniyu izotopov i yadernyh izluchenij. – M.: AN SSSR, 1958. – pp. 127-131.
44. Andreev B.M. Razdelenie stabil'nyh izotopov fiziko-himicheskimi metodami. / B.M. Andreev, YA.D. Zel'venskij, S.G. Katal'nikov. – M.: Energoatomizdat, 1982. – 208 pp.
45. Amirhanova I.B. Otnositel'noe razlichie davlenij parov $^{11}\text{BF}_3$ $^{10}\text{BF}_3$ / I.B. Amirhanova, A.V. Borisov, I.G. Gverdciteli. // Atomnaya energiya. – 1965. – Vol. 19. – pp. 20-24.
46. Zel'venskij YA.D. Razdelenie izotopov nizkotemperaturnoj rektifikaciej. / YA.D. Zel'venskij. – M.: RHTU im. D.I. Mendeleeva, 1998. – 208 p.
47. Asatiani P.YA. Issledovaniya v oblasti razdeleniya stabil'nyh izotopov legkih elementov metodom distillyacii / P.YA. Asatiani, V.A. Vlasenko, T.A. Gagua [et al.] // Abhandlungen der deutschen akademie der wissenschaften zu Berlin, Klasse fur Chemre, Geologie und Biologie. – 1964. – Vol. 7. – pp. 113-121.

48. SHemlya M. Razdelenie izotopov: Per. s fr. / M. SHemlya, ZH. Per'e. – M.: Atomizdat, 1980. – 168 p.
49. Urey H.C. The thermodynamic properties of isotopic substances / H.C. Urey // Journal of the Chemical Society (Resumed). – 1947. – pp. 562-581.
50. Sevryugova N.N. Razdelenie izotopov bora rektifikaciej hloristogo bora. / N.N. Sevryugova, O.V. Uvarov, N.M. ZHavoronkov // Doklady AN SSSR, 1959. – Vol. 126, № 5. – pp. 1044-1046.
51. Aloe A.S. Opredelenie koefficienta razdeleniya izotopov bora pri distillyacii BCl_3 v intervale temperatury 278 – 438 K. / A.S. Aloe, V.A. Kaminskij, A.G. Kudziev, R.SH. Metreveli. // Atomnaya energiya – 1980. – Vol. 49, № 2. – pp. 98 – 101.
52. Zel'venskij YA.D. Sposob razdeleniya izotopov bora. / YA.D. Zel'venskij, N.I. Toropov, S.G. Katal'nikov, V.V. Grigor'ev. // AS SSSR № 380048 ot 7.02.1973.
53. Andriec S. P. Sozdanie i ispytanie pilotnoj ustanovki dlya razdeleniya izotopov bora rektifikaciej BCl_3 / S.P. Andriec, A.A. Gushchin, A.L. Kalashnikov. // Perspektivnye materialy. – 2010. – №. 8. – pp. 193-198.
54. Panchenkov G.M. O vozmozhnosti razdeleniya izotopov bora himicheskim obmenom / G.M. Panchenkov, V.D. Moiseev, A.V. Makarov // Doklady Akademii nauk. – Rossijskaya akademiya nauk, 1957. – Vol. 112, № 4. – pp. 659-661.
55. Horoshilov A.V. Novye rabochie sistemy i novye usloviya dlya razdeleniya izotopov metodom himobmena / A.V. Horoshilov // Uspekhi v himii i himicheskoj tekhnologii. – 2019. – Vol. 33, № 1 (211). – pp. 102-105.
56. Katalnikov S.G. Physico-chemical and engineering principles of boron isotopes separation by using BF_3 – anisole BF_3 system / V.A. Ivanov, S.G. Katalnikov. // Separation Sci. and Technol. – 2001. – Vol. 36, № 8-9. – pp. 1737-1768.
57. Palko A.A, Drury J.S. // Isotope effects in chemical processes based on a symposium sponsored by division of nuclear chemistry and technology at the

153rd meeting of America Chemical Society. Miami Beach, april 11, 1967
Washington: American Chemical Society. – 1969. – pp. 119-147.

58. Panchenkov G.M. Razdelenie izotopov bora metodom himicheskogo obmena / G.M. Panchenkov, A.V. Makarov, G.V. Romanov. // ZHurnal fiz. himii. – 1961. – Vol. 35, № 6. – pp. 1315-1320.

59. Polevoj A.S. Struktura i predproektnye tekhniko-ekonomicheskie pokazateli proizvodstva izotopov bora na sibirskom himicheskome kombinatě / A.S. Polevoj, V.S. Akishin, R.G. Goloshchapov [et al.] // Sbornik dokladov 4-oj Vserossijskoj (mezhdunarodnoj) nauchnoj konferencii «Fiziko-himicheskie processy pri selekcii atomov i molekul» – 1999. – pp. 179-188.

60. Gromova D.M. Metodika opredeleniya fenola v anizole primenitel'no k processu rezadeleniya izotopov bora / D.M. Gromova, A.P. Sizov, S.A. CHerednichenko. // Uspekhi v himii i himicheskoi tekhnologii. – 2012. – Vol. 26, № 7. – pp. 41-44.

61. Orlov A.A. Razdelenie izotopov urana: uchebnoe posobie / A.A. Orlov, A.V. Abramov. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2012. – 160 p.

62. Tokmancev V.I. Razdelenie stabil'nyh izotopov bora v pryamotochnyh gazovyh centrifugah / V.I. Tokmancev, V.A. Palkin. // Atomnaya energiya. – 2017. – Vol. 123, № 1. – pp. 40-44.

63. Patent № 2720774C1 Rossijskaya Federaciya, MPK B01D 59/20 (2006.01). Sposob polucheniya obogashchennogo izotopa bor-10: № 2019124028: zayavl. 23.07.2019; opubl. 13.05.2020 / Asadulin R.S., Galkin D.E., Maslov A.YU. [et al.]. – 10 p.

64. Palkin V. A. Selektivnyj massoperenos izotopov bora v optimal'nyh kaskadah pryamotochnyh gazovyh centrifug / V.A. Palkin, S.S. Lubnin, V.I. Tokmancev. // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2021. – Vol. 94, № 3. – pp. 559-565.

65. Nervy reaktora: Atomnyj ekspert – URL: https://atomicexpert.com/reactor_nerves (data obrashcheniya 05.04.2023). – Text : electronic.

66. Adamov E.O. Belaya kniga yadernoj energetiki. Zamknutyj YATC s bystryimi reaktorami / E.O. Adamov, R.V. Arutyunyan, L.A. Bol'shov [et al.] : pod. obshch. red. prof. E.O. Adamova. – M.: Izd-vo AO «NIKIET», 2020. – 502 p.

67. Kogan, V.B. Azeotropnaya i ekstraktivnaya rektifikaciya / V. B. Kogan – L.: Goskhimizdat, 1961 g.

68. Aleksandrov I. A. Rektifikacionnye i adsorbcionnye apparaty. Metody rascheta i osnovy konstruirovaniya / I. A. Aleksandrov – 3-e izd., pererab. M.: Himiya, 1978 g. – 280 p.

69. Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii. Obshchij kurs: [Electronic resource]: v 2 kn. / V. G. Ajnshtejn, M. K. Zaharov, G. A. Nosov [et al.] : Pod red. V.G. Ajnshtejna. – 5-e izd. (el.). – M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2014. – 1758 p.

70. Baklastov, A.M. Promyshlennyye teploobmennyye processy i ustanovki / A.M. Baklastov – M.: Energoatomizdat, Ucheb. posobie. 1986 g. – 410 p.

71. Dytnerskij YU.I. Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii : Uchebnik dlya vuzov. Izd. 2-e. V 2-h kn.: CHast' 1. / YU.I. Dytnerskij. – M.: Himiya, 1995 – 400 p.

72. Dytnerskij, YU.I. Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii : Uchebnik dlya vuzov. Izd. 2-e. V 2-h kn.: CHast' 2. / YU.I. Dytnerskij. – M.: Himiya, 1995 g. – 368 p.

73. Zel'venskij YA.D. Rektifikaciya razbavlennyh rastvorov / YA.D. Zel'venskij, A. A. Titov, V. A. SHalygin : «Himiya», 1974. – 216 p.

74. Ioffe I.L. Proektirovanie processov i apparatov himicheskoy tekhnologii / I.L. Ioffe. – L.: Himiya, 1991. – 352 p.

75. Kasatkin, A.G. Osnovnyye processy i apparaty himicheskoy tekhnologii : Uchebnik dlya vuzov. / A. G. Kasatkin. – 1973 g. – M.: Al'yans, 2014. – 752 p.

76. Laptev A.G. Teoreticheskie osnovy i raschet apparatov razdeleniya gomogennyh smesej : Uchebnoe posobie. / A.G. Laptev, A.M. Konahin, N.G. Mineev. – Kazan' : Kazan. gos. energ. un-t, 2007 g. – 426 p.
77. Lapteva E.A. Gidrodinamika barbotaznyh apparatov / E.A. Lapteva. – Kazan' : Centr innovacionnyh tekhnologij, 2017. – 190 p.
78. Underwood A.J.V. Fractional distillation of multi-component mixtures / A.J.V. Underwood // Chem. Eng. Prog. – 1948. – Vol. 44. – pp. 603-614.
79. Danilov R. Y. Minimum-reflux regime of simple distillation columns / R.Y. Danilov, F.B. Petlyuk, L.A. Serafimov. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2007. – Vol. 41. – pp. 371-383.
80. Mironov V.M. Opredelenie optimal'nogo flegmovogo chisla. / V.M. Mironov. – Tomsk: TPI, 1984 g.– 15 p.
81. Pishchulin V.P. Raschet rabocheho flegmovogo chisla : Uchebnoe posobie. / V.P. Pishchulin. – Seversk: STI NIYAU MIFI, 2014 g – p. 35.
82. Orlov A.A. Polnyj raschet rektifikacionnoj kolonny: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu kursovogo proekta po kursu «Razdelenie mnogokomponentnyh izotopnyh smesej» dlya magistrantov 2 kursa, obuchayushchihsya po profilyu «Izotopnye tekhnologii i materialy» napravleniya 14.04.02 – YAdernye fizika i tekhnologii / A.A. Orlov, R.V. Malyugin : Tomskij politekhnicheskij universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2017 g. – 47 p.
83. Rozen A.M. Teoriya razdeleniya izotopov v kolonnah / A. M. Rozen. – M.: Atomizdat, 1960 g. – 436 p.
84. Skoblo A.I. Processy i apparaty neftegazopererabotki i neftekhimii : Uchebnik dlya vuzov / A.I. Skoblo, YU.K. Molkanov, A.I. Vladimirov [et al.]. – 3-e izdanie, pererabotano i dopolneno. – M.: OOO «Nedra-Biznescentra», 2000. – 677 p.
85. Ul'yanov B.A. Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii. / B.A. Ul'yanov, V.YA. Badenikov, V.G. Likuchev. – Angarsk: Izdatel'stvo Angarskoj gosudarstvennoj tekhnicheskoy akademii, 2006 g. – 743 p.

86. Devyatyh G.G Vvedenie v teoriyu glubokoj ochistki veshchestv / G.G. Devyatyh, YU. E. Elliev. – M.: Nauka, 1981. – 320 p.
87. Voskoboynikov YU.E. Osnovy vychislenij i programmirovaniya v pakete MathCAD PRIME: Uchebnoe posobie. / YU.E. Voskoboynikov, A.F. Zadorozhnyj. – 2-e izdanie. – SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2018. – 224 p.
88. OST 26-01-1488-83. Apparaty kolonnye tarel'chatye. Metod tekhnologicheskogo i gidrodinamicheskogo rascheta: data vvedeniya 29.07.1983.
89. Sukhar P.A. Program for calculating the technological and structural characteristics of plate and packed distillation columns for separating two, multicomponent mixtures and isotopes / P.A. Sukhar, A.A. Orlov, Petrov M.V. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2147, № 1. – DOI: 10.1088/1742-6596/2147/1/012014.
90. Orlov A.A. Analiz perspektivnyh rabochih sistem dlya razdeleniya izotopov bora metodom himicheskogo izotopnogo obmena s termicheskim obrashcheniem potokov faz / A.A. Orlov, P.A. Suhar' // Sbornik tezisov dokladov XVIII International Scientific Conference «Physical and Chemical Processes in Atomic Systems». – Moskva, 6-7 Dekabrya 2022 g., National Research Nuclear University MEPhI, 2022 – P. 35.
91. Orlov A.A. Osobennosti rascheta osnovnyh tekhnologicheskikh parametrov rektifikacionnyh kolonn dlya razdeleniya izotopov / Orlov A.A., Smolkin P.A., Suhar' P.A. // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika. 2022. – Vol. 65, № 5. – pp. 52-55.
92. Orlov A.A. Features of Calculating the Main Technological Parameters of Rectification Columns for Isotope Separation / A.A. Orlov, P.A. Smolkin, P.A. Sukhar // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65, №. 5. – pp. 818-822.
93. GOST 12.0.003-2015 Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Opasnye i vrednye proizvodstvennyye faktory. Klassifikaciya: data vvedeniya 2017-03-01.
94. GOST 30494-2011 Zdaniya zhilye i obshchestvennyye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyah: data vvedeniya 2013-01-01.

95. GOST 32548 - 2013. Ventilyaciya zdaniy. Vozduhoraspredelitel'nye ustrojstva. Obshchie tekhnicheskie usloviya.
96. SanPiN 1.2.3685-21 Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya: data vvedeniya 2021-01-28.
97. SP 51.13330.2011 Zashchita ot shuma. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 23-03-2003: data vvedeniya 2011-05-20.
98. SP 52.13330.2016 Estestvennoe i iskusstvennoe osveshchenie. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 23- 05-95*.
99. GOST 12.1.019-2017 Sistema standartov bezopasnosti truda. Elektrobezopasnost'. Obshchie trebovaniya i nomenklatura vidov zashchity: data vvedeniya 2019-01-01.
100. GOST R 58698-2019 (MEK 61140:2016). Zashchita ot porazheniya elektricheskim tokom. Obshchie polozheniya dlya elektroustanovok i elektrooborudovaniya: data vvedeniya 2020-06-01.
101. SP 12.13130.2009. Opredelenie kategorij pomeshchenij, zdaniy i naruzhnyh ustanovok po vzryvopozharnoj i pozharnoj opasnosti (v red. izm. № 1, utv. prikazom MCHS Rossii ot 09.12.2010 № 643): data vvedeniya 2009-05-01.
102. GOST 12.1.004-91 Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya.
103. Vozduhoduvki.pro. – Access mode: <https://vozduhoduvki.pro/> (date of the application 04.05.2023).
104. GOST R 22.0.02-2016 Bezopasnost' v chrezvyčajnyh situacijah. Terminy i opredeleniya.