



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

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы |
|---|
| Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для толерантного REMIX-топлива |

УДК 621.039.543:66.011:533.9

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------|---------|------|
| 0AM11 | Кузнецов Сергей Юрьевич | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ | Каренгин А.Г. | к.ф.-м.н., доцент | | |

Консультант (руководство ВКР на английском языке)

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------------------|----------------|------------------------|---------|------|
| Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ | Новоселов И.Ю. | ассистент | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2023 г.



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

School of Nuclear Science and Engineering

Field of training: 14.04.02 Nuclear Science and Technology

Specialization: Isotope technologies and materials

Division for Nuclear Fuel Cycle

MASTER THESIS

| Topic of research work |
|--|
| Investigation of the process of plasmachemical synthesis of oxide compounds for tolerant REMIX-fuel |

UDC 621.039.543:66.011:533.9

Student

| Group | Full name | Signature | Date |
|-------|----------------------------|-----------|------|
| 0AM11 | Kuznetsov Sergey Yurievich | | |

Scientific supervisor

| Position | Full name | Academic degree, academic rank | Signature | Date |
|---|---------------|--------------------------------|-----------|------|
| Associate professor of DNFC SNSE TPU | Karengin A.G. | PhD | | |

Advisers

| Position | Full name | Academic degree, academic rank | Signature | Date |
|---------------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------|------|
| Assistant teacher of DNFC SNSE TPU | Novoselov I.Yu. | - | | |

ADVISERS:

Section «Financial Management, Resource Efficiency and Resource Saving»

| Position | Full name | Academic degree, academic rank | Signature | Date |
|---|-----------------|--------------------------------|-----------|------|
| Associate professor of DSHS SBET TPU | Spitsyna L. Yu. | PhD | | |

Section «Social Responsibility»

| Position | Full name | Academic degree, academic rank | Signature | Date |
|---|-----------------|--------------------------------|-----------|------|
| Associate professor of DNFC SNSE TPU | Perederin Yu.V. | PhD | | |

ADMITTED TO DEFENSE:

| Program Director | Full name | Academic degree, academic rank | Signature | Date |
|-------------------------------|--------------|--------------------------------|-----------|------|
| Professor of DNFC SNSE TPU | Vidyaev D.G. | PhD | | |

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 объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения |
| ПК(У)-2 | Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии |
| ПК(У)-3 | Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов |
| ПК(У)-4 | Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах |
| ПК(У)-5 | Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета |
| ПК(У)-6 | Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов |
| ПК(У)-7 | Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов |
| ПК(У)-8 | Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение |
| ПК(У)-9 | Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО) |
| ПК(У)-10 | Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии |

LEARNING OUTCOMES

| Competence code | Competence name |
|---|---|
| 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 Ядерная физика и технологии

Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Видяев Д.Г.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

| |
|--------------------------|
| магистерской диссертации |
|--------------------------|

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|---------------------------|
| 0AM11 | Кузнецову Сергею Юрьевичу |

Тема работы:

| | |
|--|-------------------------|
| Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для толерантного REMIX-топлива | |
| Утверждена приказом директора (дата, номер) | № 27-77/С от 27.01.2023 |

| | |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | |
|--|--|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---|--|
| Исходные данные к работе | Задание. Литературные источники по основам плазмохимического синтеза оксидных композиций, по матричным материалам. Программное обеспечение «Тerra». |
| Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов | <ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор и анализ литературы по плазмохимическому синтезу оксидных композиций. 2. Определение оптимальных составов водно-органических нитратных растворов. 3. Термодинамический расчет процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций. 4. Подготовка экспериментального плазменного стенда, модельных водно-органических растворов и проведение |

| | |
|--|---|
| | <p>экспериментов с получением опытных партий порошков модельных оксидных композиций</p> <p>5. Исследование свойств порошков, синтезированных в воздушной плазме ВЧФ-разряда</p> <p>6. Экономический расчет</p> <p>7. Охрана труда и техника безопасности</p> <p>8. Выводы. Заключение</p> |
| Перечень графического материала | <p>Графики:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Схема переработки растворов уранилнитрата 2. Технологическая схема золь-гель процесса для оксидов урана и тория 3. Зависимость массовой доли веществ от температуры в конденсированной и газовой фазах, полученных при переработке ВОНР при различной массовой доле воздуха. 4. График зависимости удельных энергозатрат на плазмохимический синтез 1 кг топливной оксидной композиции 5. Схема плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона |

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

| Раздел | Консультант |
|---|---|
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Доцент Отделения социально-гуманитарных наук, к.э.н. Спицына Л.Ю. |
| Социальная ответственность | Доцент Отделения ядерно-топливного цикла, к.т.н. Передерин Ю.В. |

| | |
|---|------------|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | 27.01.2023 |
|---|------------|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------|------------------------|---------|------|
| Доцент | Каренгин | к.ф-м.н. доцент | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|---------------|---------|------|
| 0AM11 | Кузнецов С.Ю. | | |



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

School of Nuclear Science & Engineering

Field of training: 14.04.02 Nuclear Science and Technology

Specialization: Isotope technologies and materials

Nuclear Fuel Cycle Division

APPROVED BY:

Program Director

_____ Vityaev D.G

« ____ » _____ 2023

ASSIGNMENT for the Graduation Thesis completion

In the form:

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

For a student:

| Group | Full name |
|-------|----------------------------|
| 0AM11 | Kuznetsov Sergey Yurievich |

Topic of research work:

| | |
|--|----------------------------------|
| Investigation of the process of plasmachemical synthesis of oxide compounds for tolerant REMIX-fuel | |
| Approved by the order of the Director of School of Nuclear Science & Engineering (date, number): | № 27-77/C dated January 27, 2023 |

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

TECHNICAL TASK:

| | |
|--|--|
| <p>Initial date for research work: <i>(the name of the object of research or design; performance or load; mode of operation (continuous, periodic, cyclic, etc.); type of raw material or material of the product; requirements for the product, product or process; special requirements to the features of the operation of the object or product in terms of operational safety, environmental impact, energy costs; economic analysis, etc.)</i></p> | <p>Task. Literature sources on the basics of plasmachemical synthesis of oxide compounds and matrix materials. Program TERRA.</p> |
| <p>List of the issues to be investigated, designed and developed <i>(analytical review of literary sources with the purpose to study global scientific and technological achievements in the target field, formulation of the research purpose, design, construction, determination of the procedure for research, design, and construction, discussion of the research work results, formulation of additional sections to be developed; conclusions).</i></p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Review and analysis of literature on plasmachemical synthesis of oxide compositions. 2. Determination of optimal compositions of water-organic nitrate solutions. 3. Thermodynamic calculation of the process of plasmachemical synthesis of oxide compounds. 4. Preparation of an experimental plasma stand, model water-organic solutions and conducting experiments to obtain experimental samples of powders of model oxide compounds. |

| | |
|---|---|
| | <p>5. Investigation of the properties of powders synthesized in high-frequency discharge air plasma.</p> <p>6. Economic calculation.</p> <p>7. Occupational health and safety.</p> <p>8. Findings. Conclusion.</p> |
| <p>List of graphic material (with an exact indication of mandatory drawings)</p> | <p>Figure:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Scheme of processing uranyl nitrate solutions 2. Technological scheme of sol-gel process for uranium and thorium oxides 3. The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in the condensed and gas phases obtained during the WONS at different mass fraction of air. 4. Graph of the dependence of specific energy consumption on the plasmachemical synthesis of 1 kg of fuel oxide compounds 5. Schematic illustration of a plasma module based on a high-frequency plasma torch |

| Advisors to the sections of the Master Thesis (with indication of sections) | |
|---|--|
| Section | Advisor |
| Financial management, resource efficiency and resource saving | Associate professor of the Division for Social Sciences and Humanities, PhD Spitsyna L.Yu. |
| Social Responsibility | Associate professor of the Division for Nuclear Fuel Cycle, PhD Perederin Yu.V. |

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

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

| Position | Full name | Academic degree, academic rank | Signature | Date |
|--------------------------------------|---------------|--------------------------------|-----------|------|
| Associate professor of DNFC SNSE TPU | Karengin A.G. | PhD | | |

Assignment accepted for execution by a student:

| Group | Full name | Signature | Date |
|-------|----------------------------|-----------|------|
| 0AM11 | Kuznetsov Sergey Yurievich | | |

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

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

Форма представления работы:

| |
|--------------------------|
| Магистерская диссертация |
|--------------------------|

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

| | |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | |
|--|--|

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования) | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|---|------------------------------------|
| 27.01.2023 | Разработка и утверждения технического задания | 10 |
| 15.03.2023 | Подбор и изучение материалов по теме исследования | 5 |
| 20.03.2023 | Теоретический расчет растворов ВОНР | 25 |
| 10.05.2023 | Проведение экспериментальных исследований | 20 |
| 16.05.2023 | Анализ и обобщение полученных результатов | 15 |
| 18.05.2023 | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность | 15 |
| 26.05.2023 | Оформление пояснительной записки и презентации | 10 |

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------------|--------------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ | Каренгин Александр Григорьевич | к.ф-м.н. доцент | | |

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

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

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

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

Work submission form:

| |
|---------------|
| Master thesis |
|---------------|

CALENDAR RATING PLAN
completion of the final qualifying work

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

| Date control | Section (module) name / type of work (research) | Maximum section (module) score |
|--------------|--|--------------------------------|
| 27.01.2023 | Development and approval of terms of reference | 10 |
| 15.03.2023 | Selection and study of materials on the research topic | 5 |
| 20.03.2023 | Theoretical calculation of WONS solutions | 25 |
| 10.05.2023 | Conducting experimental studies | 20 |
| 16.05.2023 | Analysis and generalization of the obtained results | 15 |
| 18.05.2023 | Financial management, resource efficiency and resource saving; Social responsibility | 15 |
| 26.05.2023 | Preparation of an explanatory note and presentation | 10 |

COMPILED BY:

Scientific supervisor

| Position | Full name | Academic degree, academic rank | Signature | Date |
|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------|------|
| Associate professor of DNFC SNSE TPU | Karengin Alexand Grigorievich | PhD | | |

AGREED:

Program Director

| Position | Full name | Academic degree, academic rank | Signature | Date |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------|------|
| Professor of DNFC SNSE TPU | Vidyaev Dmitry Gennadievich | PhD, professor | | |

Abstract

Master's thesis contains: 104 pages, 27 tables, 30 figures, 28 references 3 appendixes.

Keywords: plasma, HFT-plasma torch, water-organic nitrate solution, oxide compound, REMIX-fuel.

The object of the study is the process of plasmachemical synthesis of fuel oxide compounds «PuO₂-UO₂-MgO» from water-organic nitrate solutions for tolerant REMIX-fuel.

The purpose of this work is to study and optimize the process of plasmachemical synthesis of fuel oxide compounds «PuO₂-UO₂-MgO» for the creation of accident-resistant tolerant REMIX-fuel from WONS consisting of water nitrate solutions of fissile materials (plutonium and uranium), matrix materials (magnesium), and a combustible organic component (acetone).

In the course of research, the following were conducted: calculation of the flammability of water-organic nitrate solutions, thermodynamic calculation of the synthesis of oxide compounds «PuO₂-UO₂-MgO» in air plasma, determination of optimal operating modes of a plasma stand based on a high-frequency plasma torch.

The optimal compositions of water-organic nitrate solutions and modes of their processing to ensure the direct synthesis of nanoscale oxide compounds «PuO₂-UO₂-MgO» in air plasma are determined.

Scope of application: the obtained research results can be used to create an energy-efficient technology for the production of tolerant REMIX-fuel obtained by plasma chemical synthesis.

Table of contents

| | |
|--|----|
| Introduction | 16 |
| Definitions..... | 18 |
| Designations and abbreviations | 19 |
| 1 Literature review | 20 |
| 1.1 Oxide nuclear fuel..... | 20 |
| 1.2 Nuclear fuel cycles based on REMIX-fuel | 20 |
| 1.3 Matrix materials for dispersion REMIX-fuel | 21 |
| 1.3.1 Matrix materials in the form of metal oxides | 21 |
| 1.4 Methods of obtaining fuel oxide compounds | 23 |
| 1.4.1 Methods of separate obtaining..... | 23 |
| 1.4.1.1 Thermal processing of uranyl nitrate solutions..... | 23 |
| 1.4.1.2 Thermal decomposition of ammonium polyuranates | 23 |
| 1.4.1.3 Production of uranium oxides from ammonium uranyl tricarboxylate..... | 24 |
| 1.4.2 Sol-gel method | 24 |
| 1.4.3 Plasmachemical methods for the preparation of oxide compounds..... | 25 |
| 1.4.3.1 Method of processing gaseous components..... | 26 |
| 1.4.3.2 Method of processing of dispersed liquid raw materials | 27 |
| 1.4.3.3 Method of processing of solid raw materials..... | 27 |
| 2 Calculated part | 29 |
| 2.1 Calculation of the compounds of water-organic nitrate solutions..... | 29 |

| | |
|---|----|
| 2.2 Thermodynamic calculation of the process of plasmachemical processing of WONS | 30 |
| 3 Experimental part | 42 |
| 3.1 Description of the experimental setup | 42 |
| 3.2 Determination of air flow through the plasma torch and flue | 43 |
| 3.3 Determination of gas flow through the reactor | 45 |
| 3.4 Investigation of the operating modes of HFF-plasma torch | 47 |
| 3.5 Methods of conducting experiments | 48 |
| 3.5.1 Investigation of physical-chemical properties of oxide compounds..... | 49 |
| 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..... | 52 |
| 4.1 Предпроектный анализ | 52 |
| 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования | 52 |
| 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений | 53 |
| 4.1.3 SWOT-анализ..... | 56 |
| 4.2 Инициация проекта | 58 |
| 4.2.1 Цели и результат проекта..... | 58 |
| 4.2.2 Организационная структура проекта | 59 |
| 4.2.3 Ограничения и допущения проекта | 59 |
| 4.3 Планирование управления научно-техническим проектом | 60 |
| 4.3.1 Контрольные события проекта | 60 |
| 4.3.2 План проекта..... | 60 |
| 4.3.3 Бюджет научного исследования | 63 |
| 4.3.3.1 Расчет материальных затрат | 63 |

| | |
|---|----|
| 4.3.3.2 Затраты на спецоборудование | 64 |
| 4.3.3.3 Затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования..... | 65 |
| 4.3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды..... | 68 |
| 4.3.3.5 Накладные расходы | 69 |
| 4.4 Определение ресурсной эффективности проекта..... | 70 |
| 5 Социальная ответственность | 74 |
| 5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов..... | 74 |
| 5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ВЧФ-плазмотроне и ПЭВМ | 76 |
| 5.2.1 Организационные мероприятия | 76 |
| 5.2.2 Технические мероприятия..... | 76 |
| 5.2.3 Микроклимат | 78 |
| 5.2.4 Шум и вибрация | 79 |
| 5.2.5 Электромагнитное излучение | 80 |
| 5.2.6 Освещенность..... | 81 |
| 5.2.7 Психофизиологические факторы | 85 |
| 5.3 Химическая безопасность | 85 |
| 5.4 Электробезопасность..... | 86 |
| 5.5 Пожарная и взрывная безопасность..... | 89 |
| 5.6 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях..... | 91 |
| Findings..... | 93 |
| Conclusion..... | 94 |
| References | 97 |

| | |
|------------------|-----|
| Appendixes..... | 100 |
| Appendix A | 100 |
| Appendix B | 102 |
| Appendix C | 104 |

Introduction

Natural uranium reserves amount to about 6,140,000 tons, of which Russia accounts for only 486,000 tons [1]. World uranium production in 2021 amounted to 48,000 tons, which provided 77% of global consumption. While maintaining the rates of uranium production, these reserves will be able to meet the needs of the global nuclear power industry for 100-150 years [1].

In the nuclear power industry, there is also an acute problem with spent nuclear fuel (SNF), including unburned uranium-235 and accumulated plutonium. Russia has accumulated more than 25,000 tons of spent fuel, the annual increase is 600-700 tons, and only 15% of SNF is recycled.

With this in mind, the main direction of the development of nuclear energy in Russia is the creation of a two-component nuclear power model using fast and slow (thermal) neutron-operating reactors with a closed nuclear fuel cycle.

REMIX-fuel is a promising fuel for thermal neutron reactors, created from a mixture of regenerated uranium and plutonium obtained in the process of SNF recycling. The use of REMIX-fuel will solve the problem of SNF accumulation and significantly expand the raw material base of nuclear energy.

After the accidents at the Fukushima NPP in Japan, the IAEA decided to create accident-resistant tolerant nuclear fuel.

Dispersion fuel, which includes oxides of fissile materials evenly distributed in a matrix with high thermal conductivity, is one of the promising types of tolerant fuel [4].

The methods of traditional production of fuel oxide compounds (separate production and subsequent mechanical mixing, sol-gel, etc.) are long, multistage, require high energy and labor costs and do not provide uniform distribution and the required phase composition [4].

In order to significantly reduce energy consumption, it is necessary to use plasmachemical synthesis of fuel compounds with the addition of a flammable organic component, which will also allow obtaining fuel oxide compounds with the required phase composition and uniform phase distribution in fuel tablets.

The purpose of this work is to study and optimize the process of plasmachemical synthesis of fuel oxide compounds "PuO₂-UO₂-MgO" for the creation of accident-resistant tolerant REMIX-fuel from WONS consisting of water nitrate solutions of fissile materials (plutonium and uranium) and matrix materials (magnesium) and with the addition of a combustible organic component (acetone).

To achieve this purpose, the following tasks were set:

1. To conduct a literature review on methods for obtaining fuel oxide compounds for tolerant nuclear fuel;
2. Calculate the lowest calorific value of WONS and determine the optimal compositions of WONS, ensuring their energy-efficient processing in air plasma.
3. To carry out a thermodynamic calculation of the process of plasmachemical processing of WONS and to determine the patterns of influence of the mass proportion of the plasma-supporting gas (air) on the composition of the resulting products in the gas and condensed phases.
4. To determine the optimal mode of operation of the plasma stand based on a high-frequency plasma torch, which provides energy-efficient processing of WONS in air plasma.
5. To obtain the samples of model oxide compounds and to investigate their physical-chemical properties.

The practical signification of the work is that the obtained research results can be used to create an energy-efficient technology for the production of tolerant REMIX-fuel obtained by plasmachemical synthesis.

Definitions

Accident-tolerant fuel– is nuclear fuel that is resistant to emergencies at nuclear power plants.

BET-analysis is a method of mathematical description of physical adsorption based on the theory of polymolecular (multilayer) adsorption.

HFF-plasma torch is a device for generating air–plasma flows.

Nanodisperse powder is a powder whose particle size is less than 100 nm.

Plasma is a partially or completely ionized gas formed from neutral atoms (or molecules) and charged particles (ions and electrons).

Plasma chemical synthesis is a chemical method for obtaining highly dispersed powders of nitrides, carbides, borides and oxides, consisting in the reaction in a low–temperature plasma away from equilibrium at a high rate of formation.

REMIX-fuel is a type of nuclear fuel created from a mixture of regenerated uranium and plutonium.

Scanning electron microscopy is a method of obtaining an image with high spatial resolution based on the principle of interaction of an electron beam with the object under study.

Transmission electron microscopy is a method of obtaining an image of an ultrathin sample by passing a beam of electrons through it.

X–ray phase analysis is a method of studying the structural characteristics of a material using X-ray diffraction.

Designations and abbreviations

BET-analysis – method proposed by Brunauer, Emmitt and Teller.

FOC-fuel oxide compounds.

HFF-plasma torch - high-frequency flare plasma torch.

HFFD– high-frequency flare discharge.

HFG – high-frequency generator.

IAEA – International Atomic Energy Agency.

LD- laser diffraction.

NPP– nuclear power plant

OC – oxide compounds.

REMIX- recycled mixture.

RPW – recycled process water.

SEM – scanning electron microscopy.

SNF-spent nuclear fuel.

TEM – transmission electron microscopy.

WNS – water nitrate solution.

WONS – water-organic nitrate solution.

XPA – X-ray phase analysis.

1 Literature review

1.1 Oxide nuclear fuel

REMIX-fuel is a promising fuel for thermal neutron reactors, created from a mixture of regenerated uranium and plutonium obtained in the process of SNF recycling. The use of REMIX-fuel will solve the problem of SNF accumulation and significantly expand the raw material base of nuclear energy. The disadvantages of REMIX-fuel include the high cost of SNF processing, as well as the higher radioactivity of the fuel [3].

1.2 Nuclear fuel cycles based on REMIX-fuel

There are several variants of nuclear fuel cycles (NFC) using mixed oxide uranium-plutonium fuel [2]:

- The REMIX-A nuclear fuel cycle is a cycle in which uranium and plutonium are selectively extracted during the spent fuel processing, then mixed in the initial ratio, after which 19% ^{235}U is added to ensure the necessary content of fissile materials (^{235}U , ^{239}Pu).

- The REMIX-C nuclear fuel cycle is a cycle in which uranium is selectively extracted during SNF reprocessing, then the regenerated uranium is further enriched up to 5% by ^{235}U , after which the further enriched uranium is mixed with a uranium-plutonium mixture to ensure the necessary content of fissile materials (^{235}U , ^{239}Pu);

- The REMIX-B nuclear fuel cycle is a cycle in which the recharge of the uranium-plutonium mixture with enriched uranium is not used. In this case, the plutonium content can reach more than 4%, the enriched uranium regenerate is used in the cycle, but this option is limited in the number of recycles due to the high plutonium content;

- The REMIX-E nuclear fuel cycle is a cycle in which three types of fuel are used in the manufacture of fuel pellets: conventional enriched natural uranium fuel (56%), mixed uranium-plutonium oxide fuel (26%), as well as fuel from enriched regenerated uranium (18%) [2].

According to theoretical calculations, the most cost-effective is the REMIX- E cycle [2].

1.3 Matrix materials for dispersion REMIX-fuel

One of the elements of dispersion nuclear fuel (DNF) is a matrix.

Metals, metal alloys, intermetallides, oxides, nitrides, metal carbides, as well as nonmetals, such as graphite, can be used as matrix materials [4].

Since the matrix content in DNF can reach 80%, the most important requirements for matrix materials are [4]:

- small absorption cross section of thermal neutron;
- high thermal conductivity;
- radiation and corrosion resistance;
- advanced physical and mechanical characteristics in a wide temperature range;
- plasticity and chemical compatibility with structural materials at operating temperatures of the reactor core.

In addition, the matrix material must have a melting point above the operating temperatures of the reactor core, not have phase transformations, and it is necessary to take into account the availability and cost of matrix materials [4].

1.3.1 Matrix materials in the form of metal oxides

Because uranium dioxide (UO_2) and plutonium dioxide (PuO_2) are used in fuel fabrication, metal oxide is the most preferred matrix material.

They have a number of advantages such as good thermal conductivity, high durability and melting point.

The most preferred are the following:

- zirconium dioxide (ZrO_2), which has good physical-chemical properties, is inert, but also has some disadvantages (three types of crystal structure formed at temperatures below the melting point, as well as low thermal conductivity),

- magnesium oxide (MgO) has good thermal stability and high thermal conductivity,
- cerium dioxide (CeO₂),
- aluminum oxide (Al₂O₃), has good chemical resistance and high strength over a wide temperature range,
- yttrium oxide (Y₂O₃), the main properties of which are presented in table 1.1.

Table 1.1 – Basic physical and mechanical properties of metal oxides

| Properties | Metal oxide | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|
| | Al ₂ O ₃ | MgO | CeO ₂ | Y ₂ O ₃ | ZrO ₂ |
| Melting point, °C | 2044 | 2825 | 2300 | 2438 | 2715 |
| Mapour pressure, mm Hg | 10 ⁻⁹ | 10 ⁻⁴ | 2·10 ⁻⁷ (1500°C) 6·10 ⁻⁵ (2000°C) | 2·10 ⁻⁷ (2000°C) | 2·10 ⁻⁸ (2000°C) |
| Thermal conductivity Wt/(m·K) | | | | | |
| 500°C | 13,3 | 20,0 | - | 4,1 | - |
| 1000°C | 8,2 | 13,0 | 1,2 | 2,5 | 2,1 |
| 1500°C | 5,8 | 6,0 | 0,9 | 2,9 | 2,44 |
| 2000°C | - | 5,0 | 1,2 | 4,0 | 1,8 |
| Elastic modulus E, GPa | 374,63-147,10 (293-1773K) | 295,20-219,68 (298-1573K) | 162,4(293K) | 180,1(293K) | 168,68-94,15 (293-1635K) |

Table 1.2 – Absorption and scattering cross sections of thermal neutrons for metals

| Elements | Absorption cross section of thermal neutron | | Thermal neutron scattering cross section, δ |
|----------|---|----------------|---|
| | δ | Relative units | |
| Be | 0,0095 | 1 | 7,0 |
| Mg | 0,063 | 6,6 | 4,0 |
| Zr | 0,180 | 19,0 | 8,0 |
| Al | 0,235 | 24,7 | 1,4 |

Magnesium oxide (MgO) was selected as the matrix material on the basis of a comparative analysis of the information given in Tables 1.1 and 1.2. It has a high melting point (2827 °C) and thermal conductivity at operating temperatures (13.0 W/ (m·K)), a small thermal neutron absorption cross section (0.063 barn), as well as a relatively small thermal neutron scattering cross-section (4.0 barn).

1.4 Methods of obtaining fuel oxide compounds

1.4.1 Methods of separate obtaining

In separate production methods, the necessary substances are obtained separately, after which they are mechanically mixed, pressed, and sintered.

1.4.1.1 Thermal processing of uranyl nitrate solutions

Thermal processing of uranyl nitrate solutions is based on the decomposition of uranium salts at a temperature of 200-500 ° C.

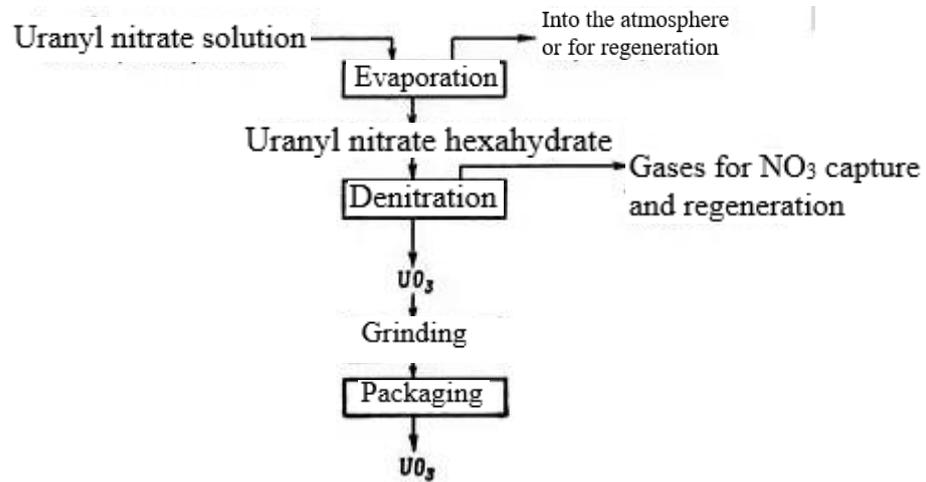


Figure 1.1 – Scheme of processing uranyl nitrate solutions

After thermal decomposition of uranyl nitrate solutions, the resulting uranium trioxide (UO₃) is reduced with hydrogen at a temperature of about 600 °C.

The advantages of the method include the relatively low cost of the process, as well as the purity of the obtained products.

The disadvantages include the fact that the properties of the obtained oxides depend on temperature, the presence of vacuum, etc.

1.4.1.2 Thermal decomposition of ammonium polyuranates

Thermal processing of uranyl nitrate is based on the decomposition of ammonium polyuranates at a temperature of 250-400 °C in the air environment.

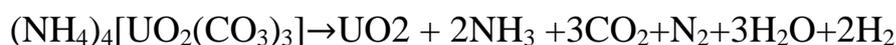


The process of decomposition of ammonium polyuranates has a number of advantages: the relatively low cost of the process, the ease of obtaining precipitation, as well as the completeness of the uranium deposition [4,5].

The disadvantages are the need for additional chemical reactions to produce dioxide and a large variation in the size of the resulting particles.

1.4.1.3 Production of uranium oxides from ammonium uranyl tricarbonate

The production of uranium dioxide during the decomposition of ammonium uranyl tricarbonate occurs in an inert medium or in a vacuum by the following reaction:



The disadvantages include the dependence of the properties on the calcination conditions.

1.4.2 Sol-gel method

The sol-gel method consists of a series of sequential operations, including preparation of the solution, conversion of the solution into sol and then into gel by hydrolysis and condensation, as well as subsequent ageing and drying of the product.

The precursors are solutions of uranyl nitrate $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ and thorium nitrate $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$.

The sizes of the resulting particles have a nanoscale structure and reach sizes of the order of 5-100 nm.

With the help of the sol-gel process, it is possible to synthesize various compounds, and this process also allows you to obtain homogeneous compounds, but it is quite capacious in hardware design.

Figure 1.2 shows the doping scheme.

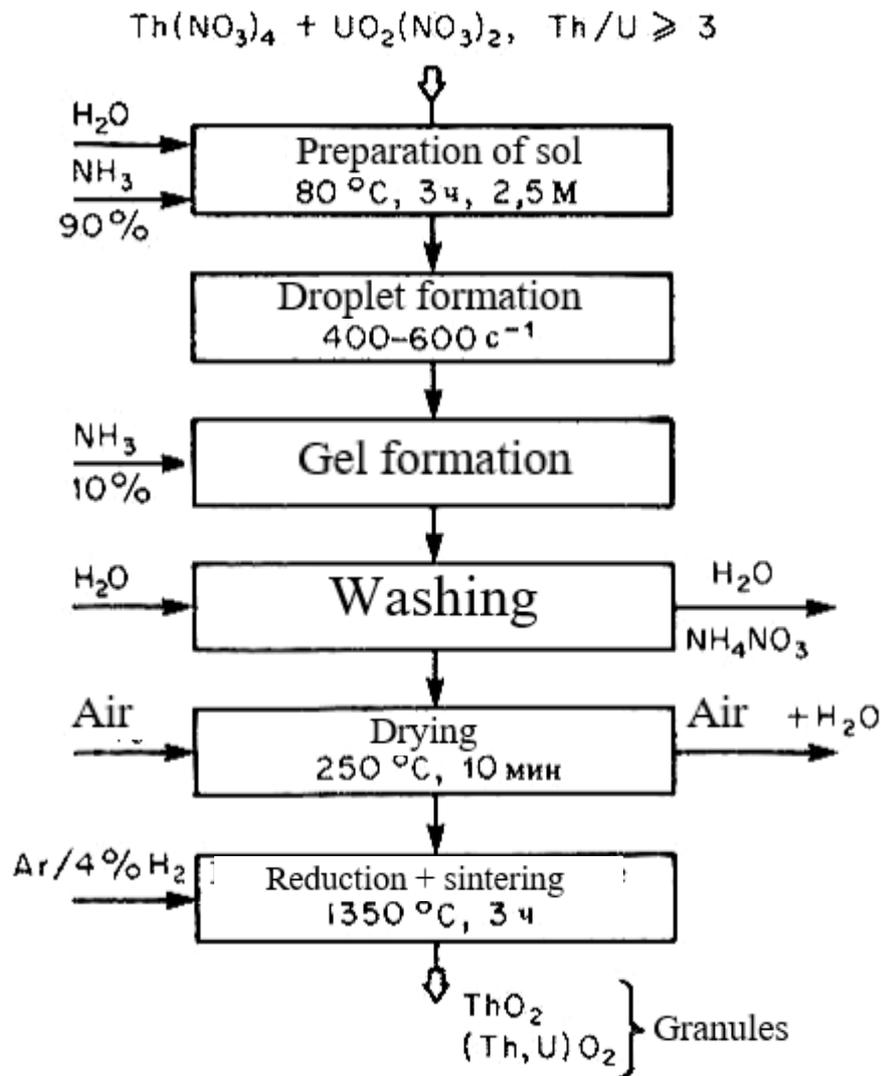


Figure 1.2 – Technological scheme of sol-gel process for uranium and thorium oxides

1.4.3 Plasmachemical methods for the preparation of oxide compounds

The plasmachemical method of obtaining oxide compounds has a high reaction rate, and allows obtaining nanoscale particles with a uniform phase distribution.

It is advisable to synthesize oxide compounds using quenching of the obtained oxide powders.

For plasmachemical synthesis, an arc, microwave, or glow discharge with a plasma temperature of about 3000 - 8000 K is used [7].

The characteristics of the resulting compounds depend on the composition of the feedstock, plasma-supporting gas and its flow rate, as well as on the temperature of the plasma jet.

Particles moving through the plasma receive energy, heat up and evaporate, after which interactions of vaporized substances occur.

The process difficulties are in the separation of powders from the gas phase.

Plasmachemical processing methods are divided into three groups:

- 1) processing of gaseous raw materials;
- 2) processing of liquid raw materials;
- 3) processing of raw materials in the form of solid particles.

1.4.3.1 Method of processing gaseous components

The feedstock is fed into the reactor where it is heated and then evaporated.

After that, the processes of chemical reactions and the formation of particles in the gas phase occur.

Next, the process of condensation of the substance occurs in the volume or on the walls of the equipment.

The growth of nucleus occurs in two ways: evaporation and transfer of matter from smaller particles to large ones, or by coagulation, i.e. by aggregation of particles.

To prevent the growth of nucleus, "hardening" is used, sharp cooling leads to an increase in the number of nucleus, which in turn limits the growth of neighboring nucleus.

The plasmachemical method has a number of significant advantages: one-stage process, high productivity, uniformity of phase distribution in the resulting compositions.

The disadvantage is high-energy consumption.

1.4.3.2 Method of processing of dispersed liquid raw materials

When using liquid raw materials, the solution is fed into the plasma reactor using centrifugal or pneumatic dispersers, which significantly increases the productivity of the process.

During plasmachemical processing of liquid raw materials, chemical reactions can occur both in the liquid and in the gas phase.

The method of processing of dispersed liquid raw materials has a number of advantages: the possibility of synthesizing various oxide compounds and the ability to influence physical-chemical properties.

The physical and mechanical characteristics of the synthesized particles depend on the composition of the feedstock, the operating temperature in the reactor, as well as on the plasma-supporting gas.

Plasma processing of liquid raw materials makes it possible to significantly expand the "circle" of used raw materials, and is more cost-effective compared to the processing of gaseous compounds.

1.4.3.3 Method of processing of solid raw materials

When processing solid raw materials, the starting materials are fed into the reactor in the form of powders.

When the powder enters the reactor, they are rapidly heated, melted and evaporated because of high temperatures.

The chemical reaction takes place in the gaseous phase, after which the resulting product can be converted into the solid phase [8].

Due to the use of solid raw materials, the resulting compounds have larger dimensions than when processing liquid or gaseous raw materials.

Thus, the use of this method makes it possible to expand the raw material base and obtain dispersed oxide compounds of various compositions, which is of great interest.

The disadvantages of this method are the presence of impurities of the starting substances in the resulting compounds.

Taking above into account, it can be concluded that the plasmachemical method of production allows synthesizing compounds with a diverse phase composition while maintaining a uniform phase distribution, has lower energy consumption than other methods (using combustible organic components), and in addition has an extensive raw material base since it is possible to process raw materials in any phase state.

2 Calculated part

2.1 Calculation of the compounds of water-organic nitrate solutions

To calculate the compounds of a water-organic nitrate solution, the ratio of the mass fraction of fissile materials and the matrix was set, the mass fraction of the dissolved substance and water was determined using the specific solubility of salts.

Since the content of the target substances in nitrates and oxides differs, coefficients were used for the transition from the mass fraction of oxides to the mass fraction of nitrates.

Next, the composition of solutions with the addition of a combustible organic component was determined and the lowest calorific value was calculated according to the Formula 2.1:

$$Q_l^C = \frac{(100 - W - A) \cdot Q_H^C}{100} - \frac{2,5 \cdot W}{100}, \quad (2.1)$$

where W - percentage of water in the solution; A - percentage of nonflammable substances in the solution; Q_H^C - lowest calorific value of the organic component, MJ/kg; The coefficient 2.5 takes into account the latent heat of evaporation of water at 0 °C, MJ/kg.

Table 2.1 shows the flammability of organic substances.

Table 2.1 – Burning indices of organic substances

| Flammability index | Substance | | | | |
|-------------------------|-----------|----------|---------|----------|---------|
| | Acetone | Methanol | Ethanol | Propanol | Butanol |
| Q_l^C , MJ/kg | 31,54 | 19,95 | 26,80 | 31,38 | 33,47 |
| $T_{Flashes}$, K | 254 | 284 | 285 | 285 | 302 |
| $T_{self-ignition}$, K | 738 | 658 | 619 | 673 | 618 |

Acetone (C_3H_6O) was chosen as a combustible organic component, since it has good mutual solubility with water, has a high calorific value, and is easily accessible.

To provide the necessary conditions, solutions with a lower calorific value of about 8 MJ/kg were selected.

Calculations of the compounds are shown in Appendix A.

However, the lower calorific value is not an objective indicator, therefore, the adiabatic combustion temperature of the solution was chosen as the optimal criterion, determined by the Formula 2.2:

$$T_{ad} = \frac{(100 - \nu_{ox}) \cdot Q_l^c + \nu_{ox} C_{ox} t_{ox}}{100 C'_p}, \quad (2.2)$$

where ν_{ox} - percentage of the oxidizer (air); Q_l^c - lowest calorific value kJ/kg; C_{ox} - heat capacity of the oxidizer, kJ/(kg·K); t_{ox} - temperature of the oxidizer, K; C'_p - specific equilibrium heat capacity of the processed products WONS, kJ/(kg ·K).

It can be seen from Formula 2.2, the adiabatic combustion temperature depends on the mass fraction of air, but the composition of the resulting compounds in the condensed phase also depends on the fraction of air, therefore, a thermodynamic calculation of the process of plasmachemical processing of WONS determined at the first stage in a wide temperature range was carried out.

2.2 Thermodynamic calculation of the process of plasmachemical processing of WONS

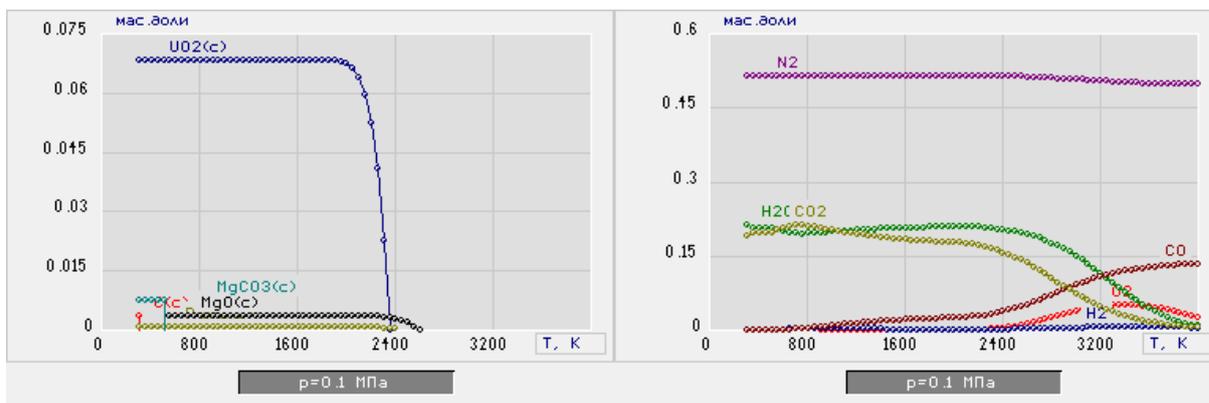
The phase composition of plasma processing products was determined by thermodynamic calculation with the program TERRA.

TERRA is a program designed to calculate the phase compositions of heterogeneous systems.

During the calculations, the following initial data were set: pressure 0.1 MPa, temperature 300–4000 K, and the mass fraction of air 5–90%.

The compounds are shown in Appendix A.

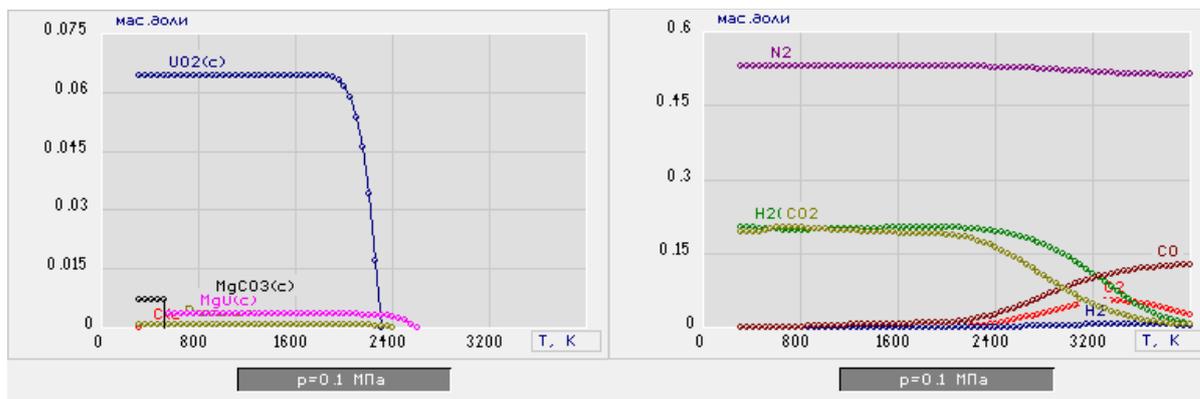
Figures 2.1 – 2.3 show the dependence of the mass fraction of substances in the condensed and gaseous phases obtained during plasma processing of the WONS 1÷3 with the required mass fraction of magnesium oxide 5%.



a)

b)

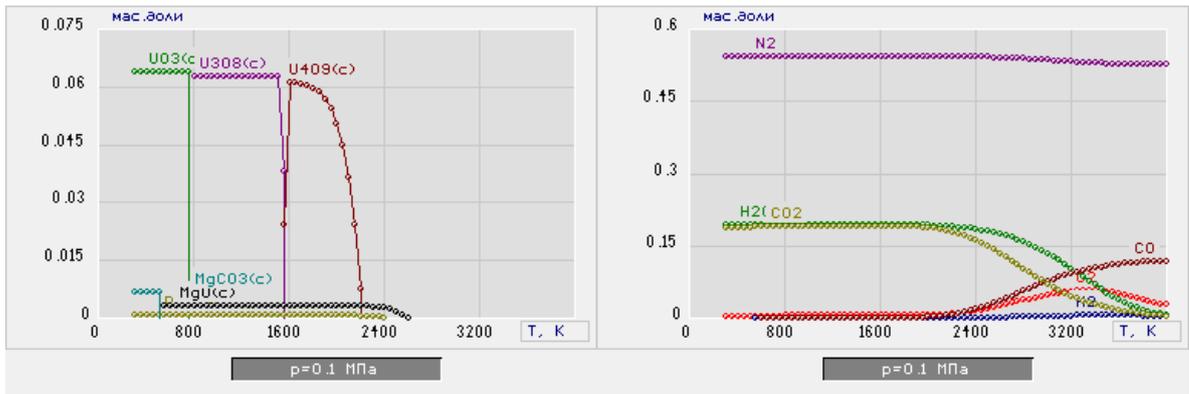
Figure 2.1 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-1 with an air content of 66%



a)

b)

Figure 2.2 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-2 with an air content of 68%

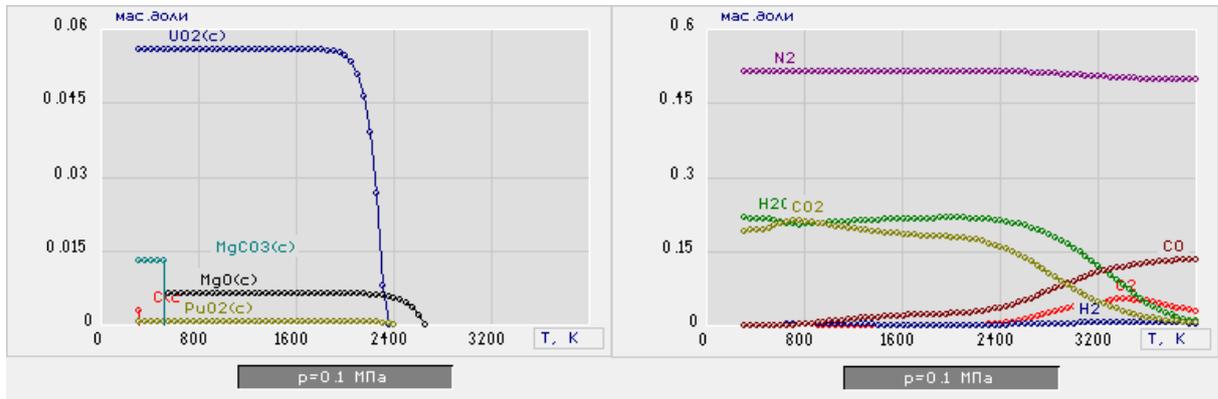


a)

b)

Figure 2.3 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-3 with an air content of 70%

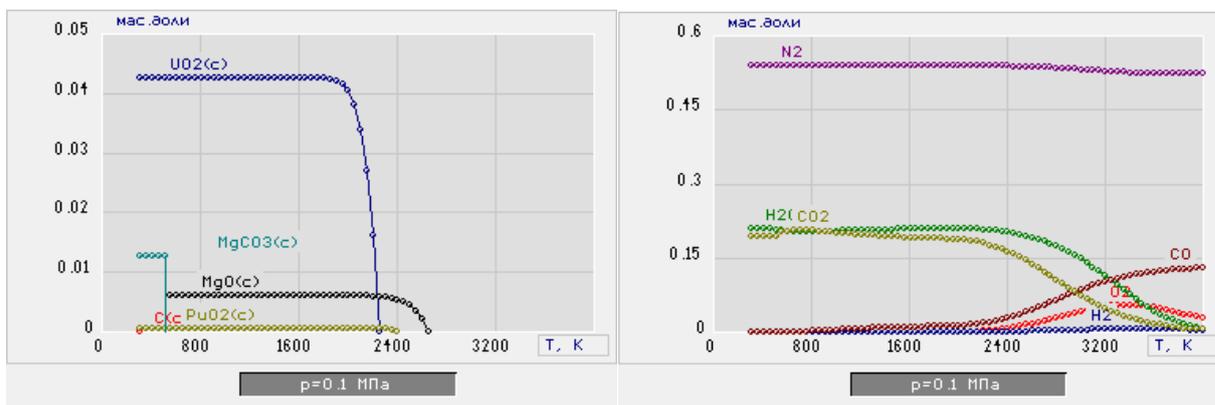
Figures 2.4 – 2.6 show the dependence of the mass fraction of substances in the condensed and gaseous phases obtained during plasma processing of the WONS4÷6 with the required mass fraction of magnesium oxide 10%.



a)

b)

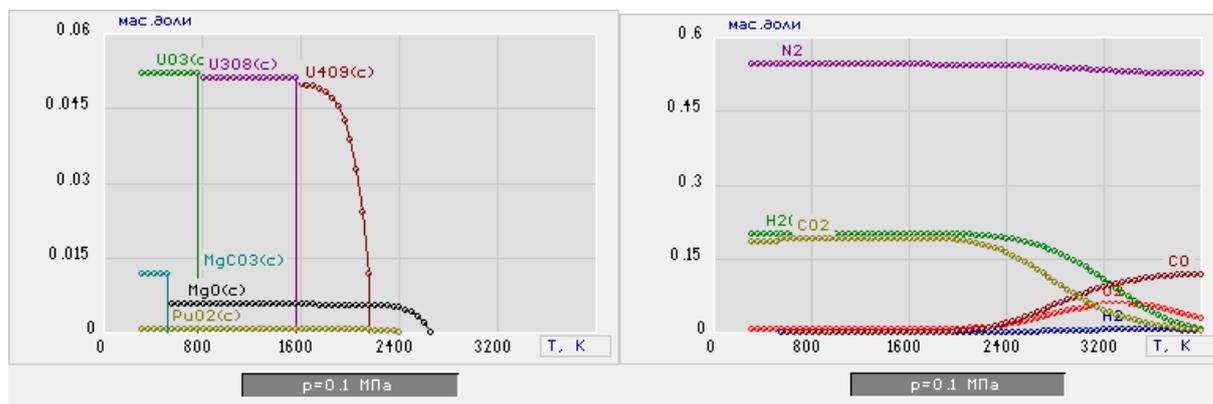
Figure 2.4 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-4 with an air content of 66%



a)

b)

Figure 2.5 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-5 with an air content of 68%

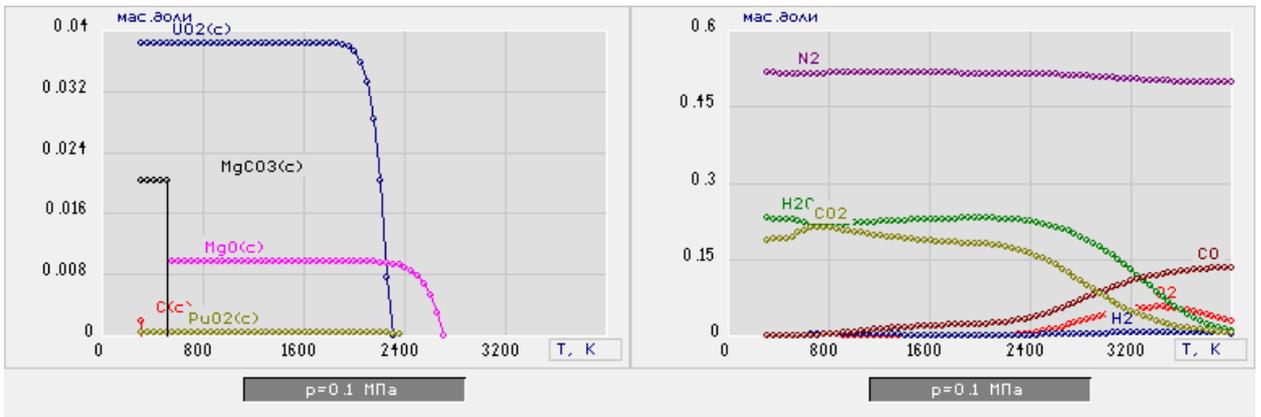


a)

b)

Figure 2.6 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-6 with an air content of 70%

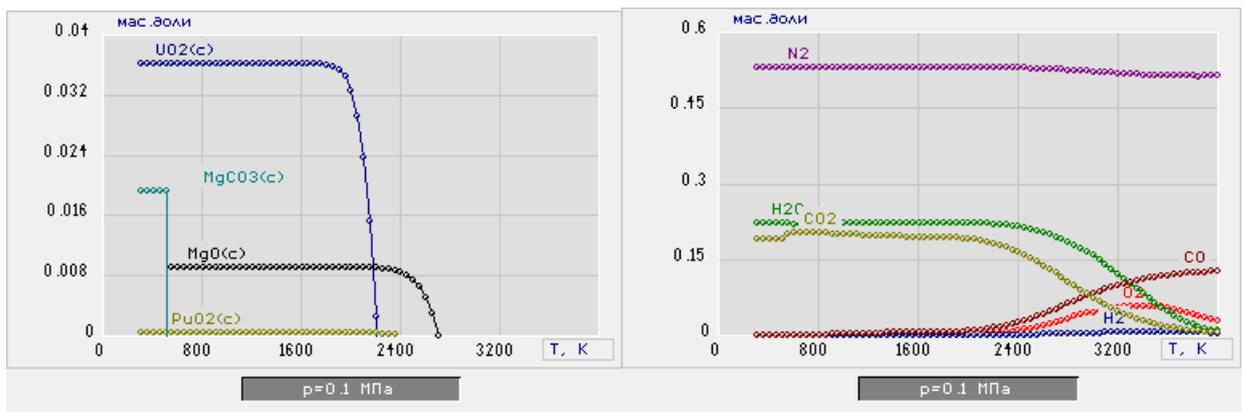
Figures 2.7 – 2.9 show the dependence of the mass fraction of substances in the condensed and gaseous phases obtained during plasma processing of the WONS 7÷9 with the required mass fraction of magnesium oxide 20%.



a)

b)

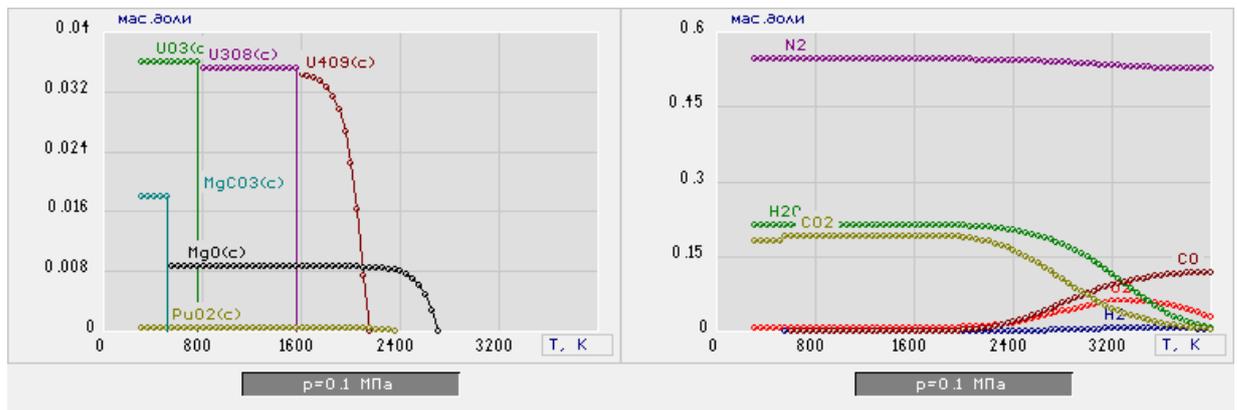
Figure 2.7 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-7 with an air content of 66%



a)

b)

Figure 2.8 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-8 with an air content of 68%

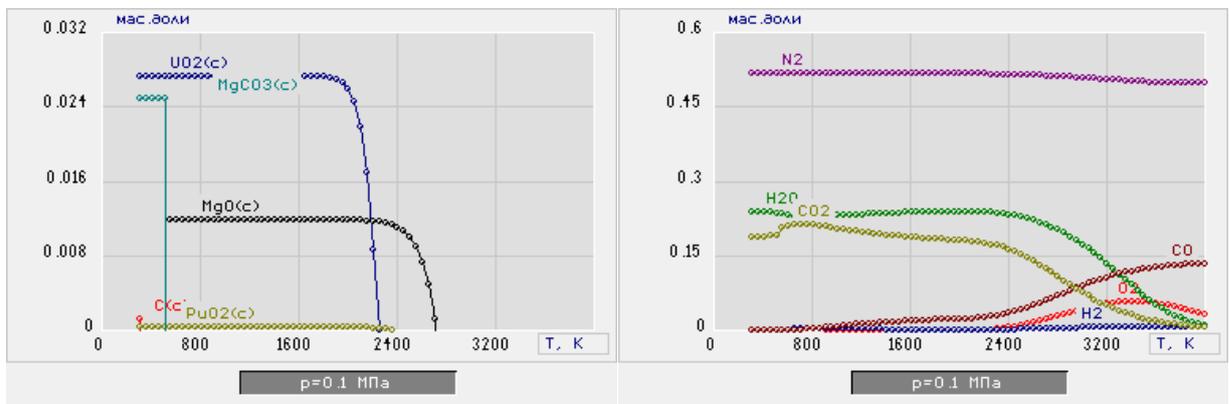


a)

b)

Figure 2.9 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-9 with an air content of 70%

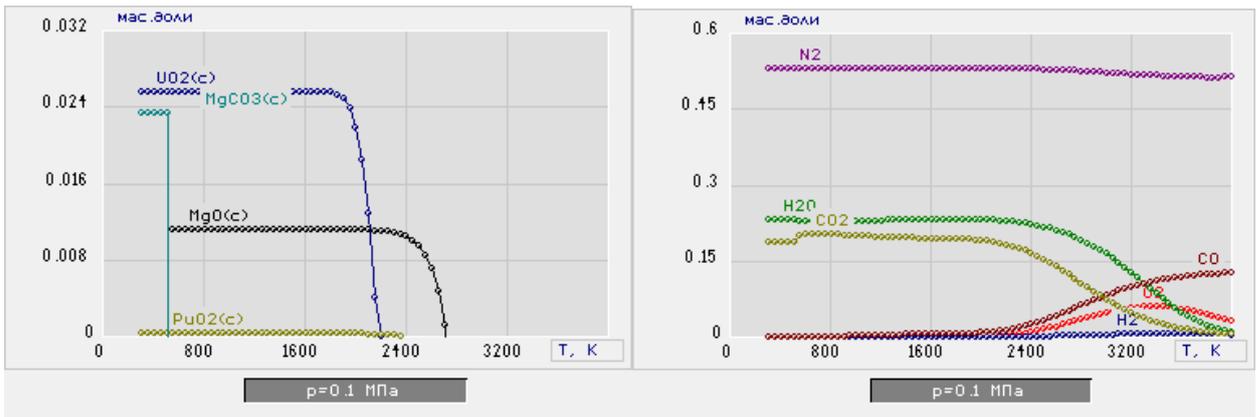
Figures 2.10 – 2.12 show the dependence of the mass fraction of substances in the condensed and gaseous phases obtained during plasma processing of the WONS 10÷12 with the required mass fraction of magnesium oxide 30%.



a)

b)

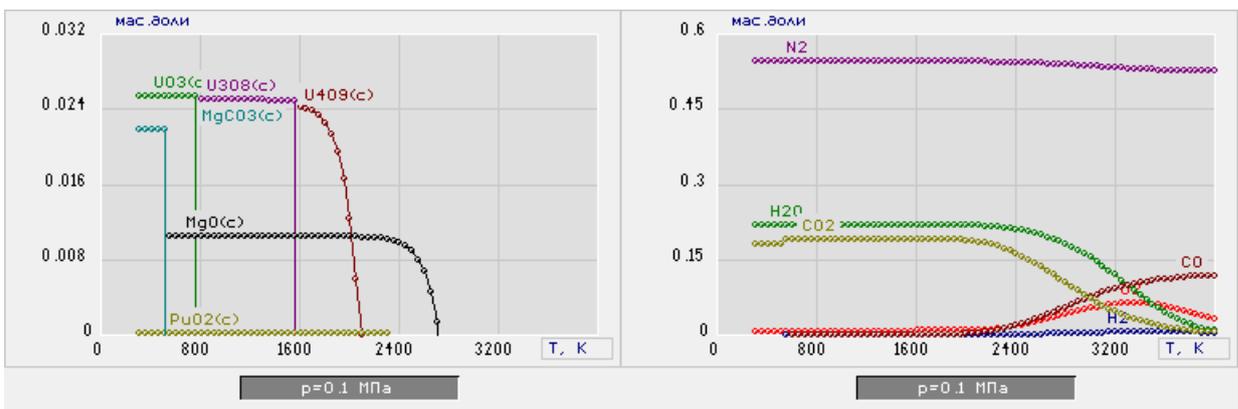
Figure 2.10 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-10 with an air content of 66%



a)

b)

Figure 2.11 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-11 with an air content of 68%

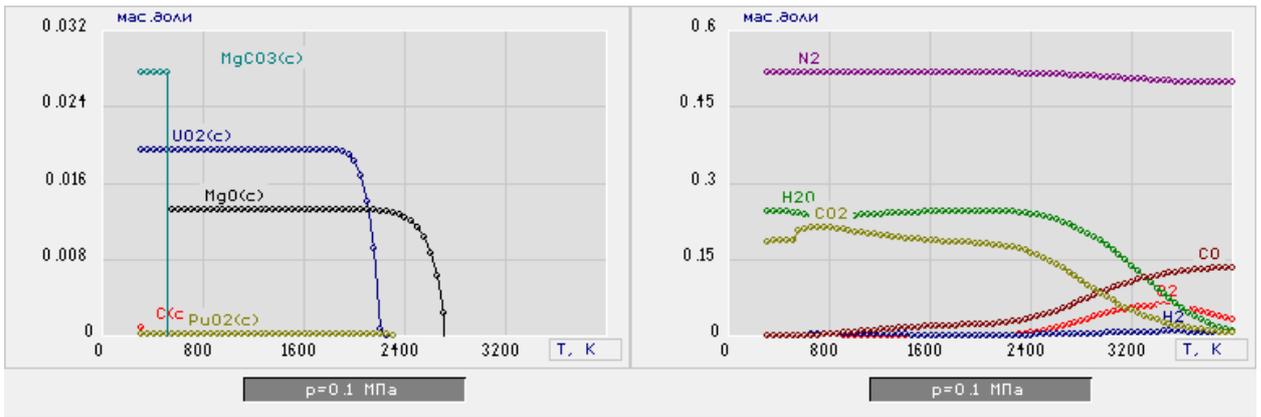


a)

b)

Figure 2.12 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-12 with an air content of 70%

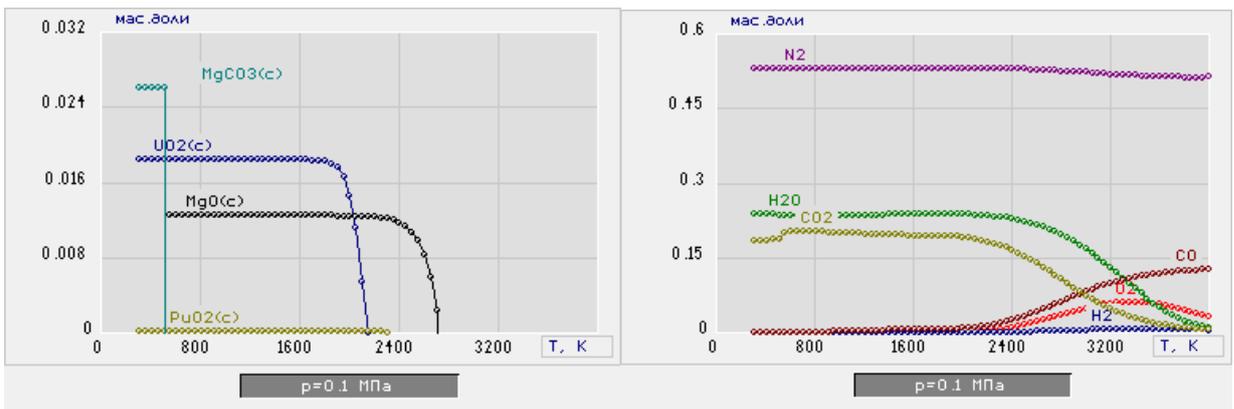
Figures 2.13 – 2.15 show the dependence of the mass fraction of substances in the condensed and gaseous phases obtained during plasma processing of the WONS 13÷15 with the required mass fraction of magnesium oxide 40%.



a)

b)

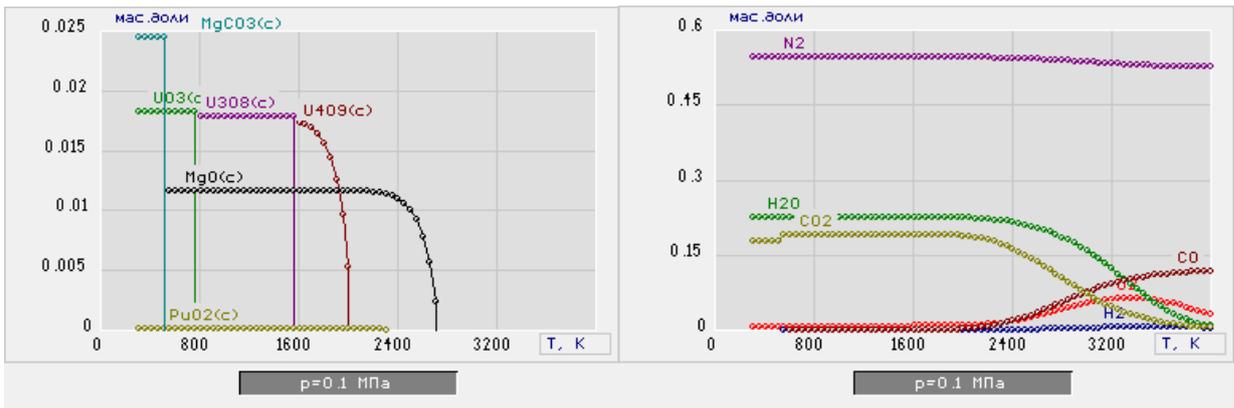
Figure 2.13 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-13 with an air content of 66%



a)

b)

Figure 2.14 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-14 with an air content of 68%

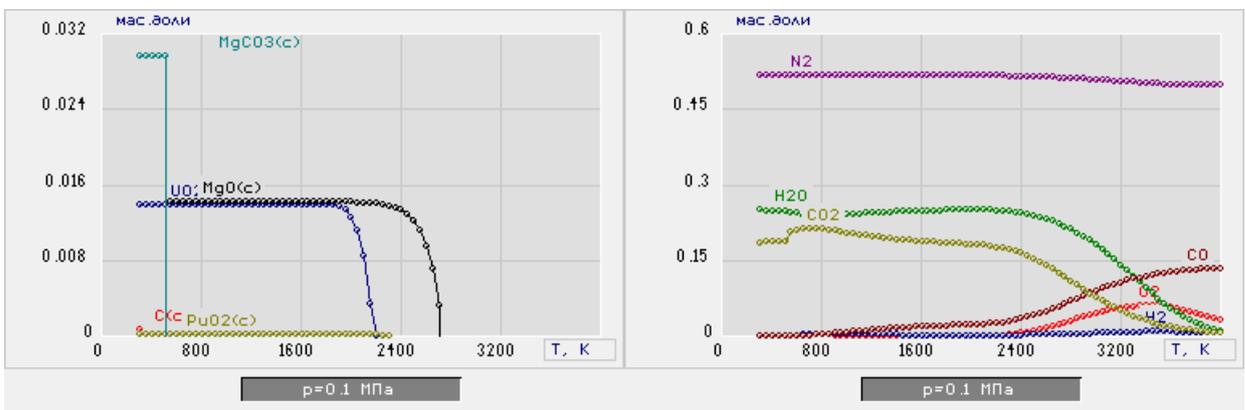


a)

b)

Figure 2.15 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-15 with an air content of 70%

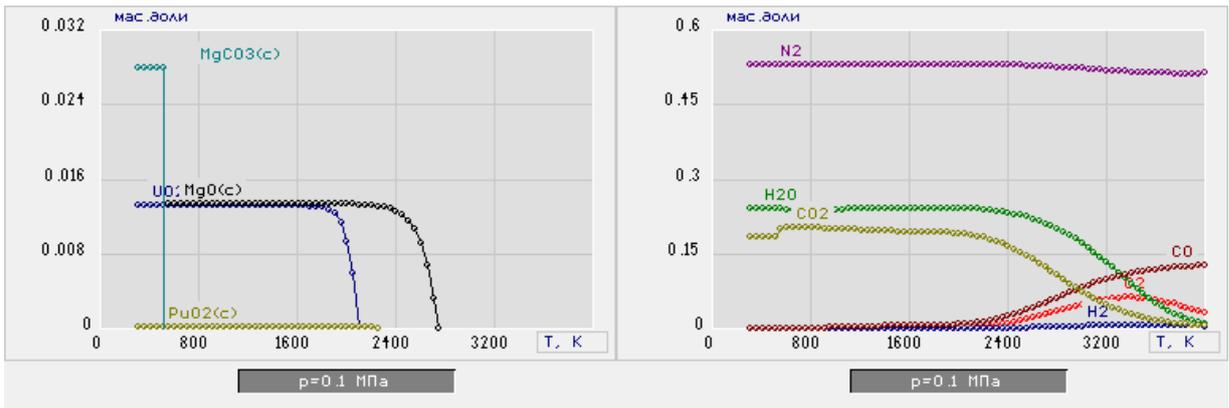
Figures 2.16 – 2.18 show the dependence of the mass fraction of substances in the condensed and gaseous phases obtained during plasma processing of the WONS 16÷18 with the required mass fraction of magnesium oxide 50%.



a)

b)

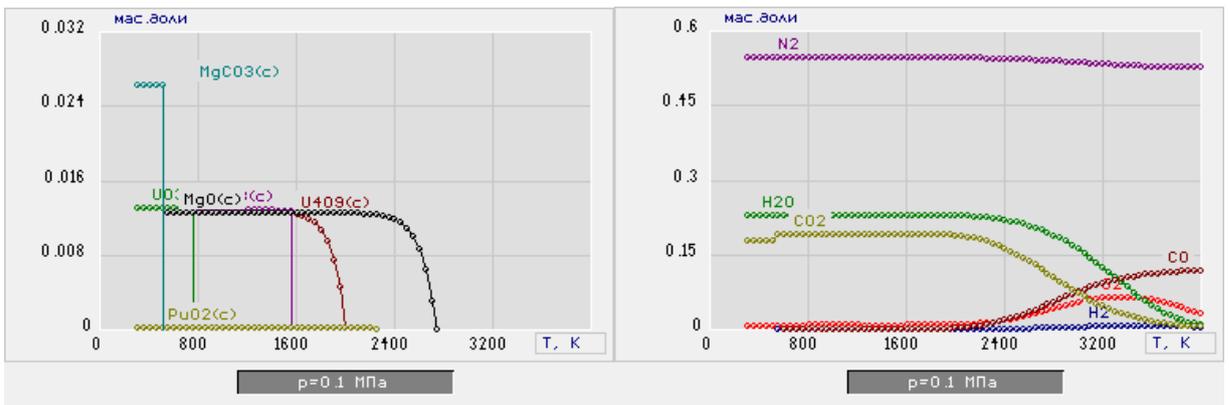
Figure 2.16 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-16 with an air content of 66%



a)

b)

Figure 2.17 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-17 with an air content of 68%



a)

b)

Figure 2.18 – The dependence of the mass fraction of substances on the temperature in condensed (Fig. a) and gas (Fig. b) obtained during the processing of WONS-18 with an air content of 70%

From the analysis of the graphs, it can be seen that air fraction of less than 68% gives the following products: carbon C(c), magnesium oxide MgO(c), uranium dioxide $UO_2(c)$, plutonium dioxide $PuO_2(c)$, and magnesium carbide $MgCO_3(c)$. However, carbon and magnesium carbide are formed at temperatures significantly lower than the operating one.

From the analysis of the graphs, it can be seen that air mass fraction of 66% gives the following products in condensed phase: $\text{UO}_2(\text{c})$, $\text{PuO}_2(\text{c})$, $\text{MgO}(\text{c})$, as well as carbon $\text{C}(\text{c})$ and $\text{MgCO}_3(\text{c})$, which are formed at temperatures significantly lower than operating.

Figures 2.1–2.18 also show that with air mass fraction of 68% gives the required fuel oxide compounds containing $\text{UO}_2(\text{c})$, $\text{PuO}_2(\text{c})$ and (5-50%) $\text{MgO}(\text{c})$. They are formed without the formation of $\text{C}(\text{c})$. Air mass fraction of more than 68% gives non-target uranium oxides $\text{UO}_3(\text{c})$, $\text{U}_3\text{O}_8(\text{c})$ and $\text{U}_4\text{O}_9(\text{c})$ instead of the target oxide $\text{UO}_2(\text{c})$.

Calculations of the total energy consumption for the production of fuel oxide compounds by the method of plasmachemical synthesis according to the following formula are carried out:

$$E_{\text{gen}} = H_{\text{T}} - H_{300}, \quad (2.3)$$

where E_{gen} – total energy consumption, MJ/kg;

H_{T} - total enthalpy of the plasma jet at operating temperature, MJ/kg;

H_{300} - total enthalpy of the plasma jet at a temperature of 300 K, MJ/kg.

Calculations of specific energy consumption for the production of fuel oxide compounds by plasmachemical synthesis according to the following formula have been carried out:

$$E_{\text{sp}} = \frac{E_{\text{gen}}}{Z}, \quad (2.4)$$

where E_{sp} - specific energy consumption for obtaining one kilogram of the fuel oxide compound, MJ/kg; Z - is the mass fraction of the fuel oxide compounds.

The results of cost calculations are shown in Figure 2.19

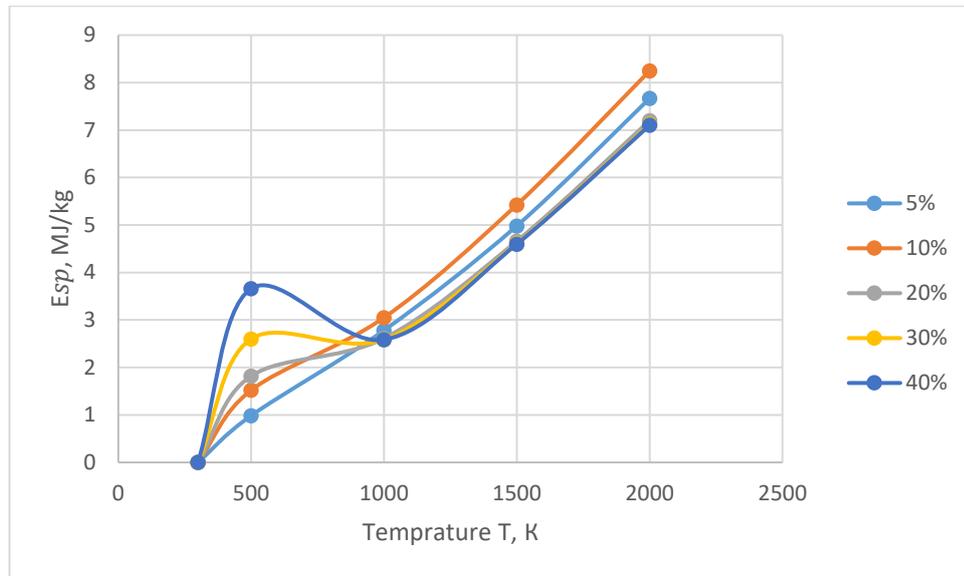


Figure 2.19 – Graph of the dependence of specific energy consumption on the plasmachemical synthesis of 1 kg of fuel oxide compound with air mass fraction of 68% and different matrix content (MgO)

Figure 2.19 shows that specific costs increase with an increase in operating temperature, and with an increase in the proportion of the matrix in the FOC.

The inflection is because at these temperatures the mass fraction of oxide compounds is significantly less than at higher temperatures.

Based on the conducted studies, it is possible to determine the optimal parameters for the plasmachemical synthesis of fuel oxide compounds. They are the mass fraction of air (lower 68%), temperature in the reactor (in the range 1400–1800 K), specific energy consumption for obtaining one kilogram of FOC «PuO₂–UO₂–MgO» (2.6 – 8.3 MJ/kg).

3 Experimental part

3.1 Description of the experimental setup

Studies of the plasma processing of dispersed WONS in an air-plasma jet were carried out with the help of the experimental installation "Plasma module based on a high-frequency plasma torch".

The plasma stand is shown in Figure 3.1.

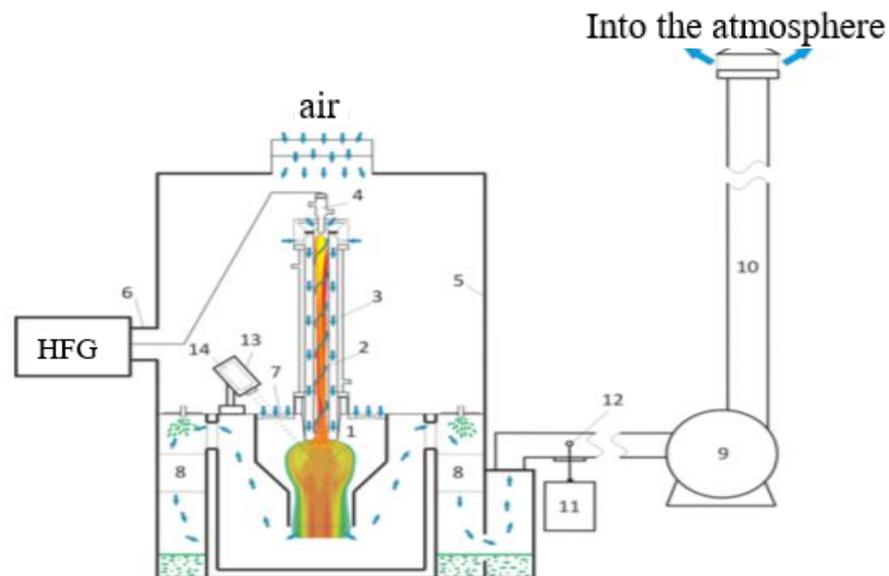


Figure 3.1 – plasma module based on a high-frequency plasma torch: 1-disperser, 2-HFT discharge, 3-HF plasma torch, 4- copper electrode, 5-case, 6- coaxial output, 7- recator impeller, 8- «wet cleaning» unit, 9- exhaust fan, 10- gas duct, 11- gas analyzer, 12- sampler, 13- pyrometer cover, 14- pyrometer.

The energy from the HFG is supplied to the copper water-cooled electrode 3 through the coaxial output 6.

The torch discharge 2 is initiated from the electrode 4 inside the quartz discharge chamber of the plasma torch ($d = 50$ mm, $L = 860$ mm).

An exhaust fan 9 pumps the exhaust gases out.

An impeller 7 is installed at the entrance to the reactor, with a maximum input area $S_p = 1650$ cm². Above the impeller there is a sliding shutter consisting of 10 sections, the opening or closing of which allows you to adjust the airflow through the impeller into the reactor.

Using a Pitot tube and a gas analyzer, the pressure, velocity and air flow through the plasma torch, gas duct and reactor were determined.

The operating temperature in the reactor was monitored by a digital infrared pyrometer.

3.2 Determination of air flow through the plasma torch and flue

The mass air flow through the quartz tube of the plasma torch and the gas duct was determined using a Pitot tube.

The flow of plasma-supporting gas created a pressure was measured using a Pitot tube.

The air flow was determined by the following formula:

$$f = \frac{(\rho V^2)}{2} = P_F - P_{ST}, \quad (3.1)$$

where ρ – air density at normal temperature, kg;

V – airflow speed;

P_F – full pressure, Pa;

P_{ST} – static pressure, Pa.

Expressing the air flow velocity from Formula 3.1 we obtain the following equation:

$$V = \left[\frac{2 \cdot (P_F - P_{ST})}{\rho} \right]^{0,5} \quad (3.2)$$

The volumetric air flow is calculated using the following formula:

$$Q = S \cdot V, \quad (3.3)$$

where S is the cross-sectional area of the duct.

The air flow pressure was measured with a different number of closed sliding shutter segments, which changed the input area of the impeller.

Table 3.1 – Air pressure through the plasmatron at different impeller area

| № | S_{imp} | | $\rho v^2/2$, mBar | | | | | | | f_{av} mBar |
|---|-----------|-----------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| | 3xN | cm ² | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 1 | 3x10 | 1650 | 4,01 | 3,97 | 4,02 | 3,98 | 4,03 | 4,02 | 4,04 | 4,01 |
| 2 | 3x8 | 1320 | 3,09 | 3,07 | 3,05 | 3,09 | 3,11 | 3,08 | 3,12 | 3,09 |
| 3 | 3x6 | 990 | 2,88 | 2,89 | 3 | 2,87 | 2,8 | 2,87 | 2,85 | 2,88 |
| 4 | 3x4 | 660 | 2,68 | 2,66 | 2,64 | 2,68 | 2,66 | 2,69 | 2,69 | 2,67 |

Table 3.2 – Air pressure through the high-frequency plasma torch at different impeller areas

| № | S_{imp} | | $\rho v^2/2$, mBar | | | | | | | f_{av} mBar |
|---|-----------|-----------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| | 3xN | cm ² | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 1 | 3x10 | 1650 | 2,21 | 2,27 | 2,27 | 2,24 | 2,23 | 2,21 | 2,23 | 2,24 |
| 2 | 3x8 | 1320 | 2,46 | 2,48 | 2,46 | 2,44 | 2,49 | 2,48 | 2,48 | 2,47 |
| 3 | 3x6 | 990 | 2,62 | 2,66 | 2,64 | 2,63 | 2,6 | 2,61 | 2,59 | 2,62 |
| 4 | 3x4 | 660 | 3,57 | 3,68 | 3,55 | 3,52 | 3,64 | 3,62 | 3,64 | 3,6 |

Using Table 3.1 and Formulas 3.1-3.3, a calculation was carried out and a graph was plotted showing the dependence of the plasma-supporting gas flow through the discharge chamber 10 of the high-frequency plasma torch on the input area of the impeller.

The resulting dependence is shown in Figure 3.2.

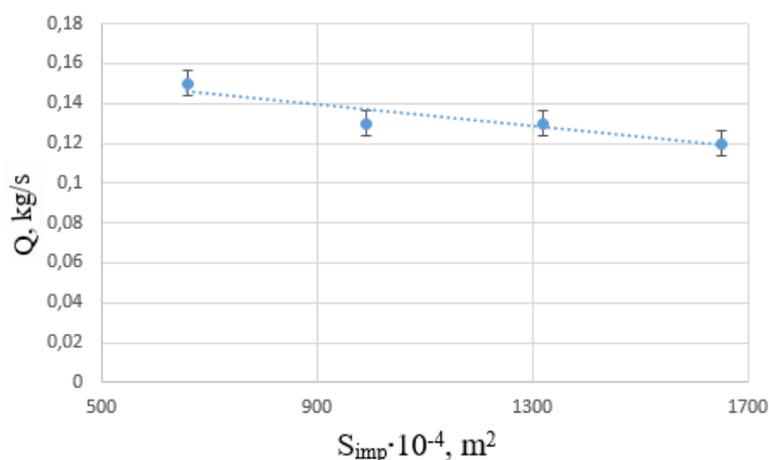


Figure 3.2 – The effect of the input area of the reactor impeller on the mass flow of plasma-forming gas through the discharge chamber of the high-frequency plasma torch

It follows from the graph that the mass flow rate of the plasma-supporting gas through the discharge chamber of the high-frequency plasma torch decreases linearly with an increase in the input area of the reactor impeller.

Using the data in Table 3.2 and Formulas 3.1-3.3, a calculation was made and a graph was plotted. It reflects the dependence of the plasma-supporting gas flow through the gas duct after the wet cleaning unit on the input area of the impeller. This dependence is shown in Figure 3.3.

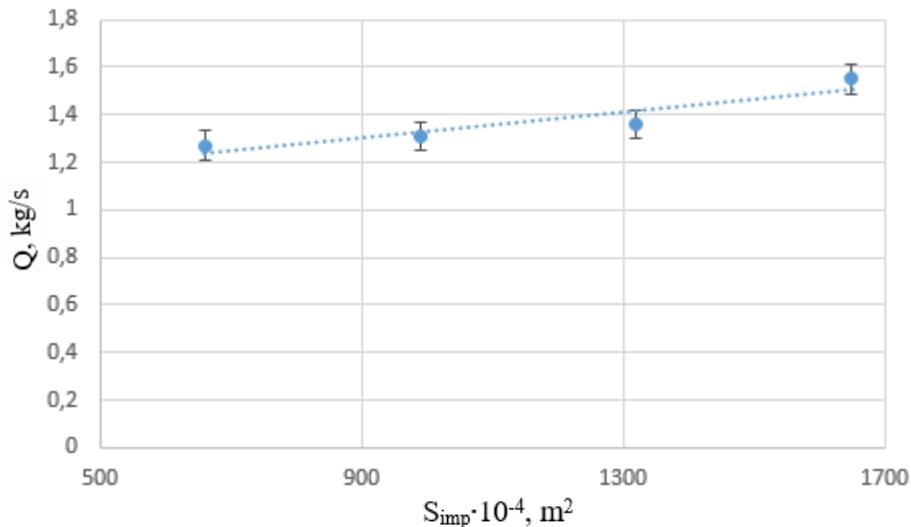


Figure 3.3 – Influence of the inlet area of the reactor impeller on the mass flow of plasma-supporting gas through the gas duct

From the obtained data, shown in Figure 3.3, it follows that an increase in the inlet area of the reactor impeller leads to an increase in the mass flow rate of air through the gas duct.

3.3 Determination of gas flow through the reactor

To determine the mass flow rate of air through the reactor, the Formula 3.4 was used, which allows calculating this parameter as the difference in flow rates through the flue and the plasma torch.

$$Q_P = Q_{fl} - Q_{pt} \quad (3.4)$$

where Q_P – volumetric flow rate of the air coolant through the reactor, m^3/s ;

Q_{fl} – volumetric flow rate of the air coolant through the gas duct, m^3/s ;

Q_{pt} – volumetric flow rate of plasma-forming gas through a high-frequency plasma torch, m³/s.

Data on the mass airflow through the reactor, as well as data on the air flow through the discharge chamber and the gas duct are given in Table 3.3.

Table 3.3 – Results of calculations of the mass air flow

| № | S_{imp} | | Gas duct | | | HFT plasmatron | | | Reactor | | |
|---|-----------|-----------------|-----------------|------------|-----------------|-----------------|------------|-----------------|----------|----------------------------|--------------|
| | 3xN | cm ² | f_{av} , mBar | P_f , Pa | Q_{fl} , kg/s | f_{av} , mBar | P_f , Pa | Q_{fl} , kg/s | T , °C | ρ , kg/m ³ | Q_P , kg/s |
| 1 | 3x10 | 1650 | 4,02 | 399,95 | 1,56 | 2,23 | 223,75 | 0,12 | 21 | 1,20 | 1,42 |
| 2 | 3x8 | 1320 | 3,08 | 307,66 | 1,37 | 2,45 | 246,68 | 0,13 | | | 1,22 |
| 3 | 3x6 | 990 | 2,89 | 286,74 | 1,31 | 2,63 | 261,35 | 0,13 | | | 1,19 |
| 4 | 3x4 | 660 | 2,68 | 266,66 | 1,28 | 3,61 | 358,91 | 0,15 | | | 1,12 |

Based on the data from Table 3.3, a graph was plotted reflecting the relationship between the mass flow rate of air through the reactor and the size of the input area of the impeller. It is shown in Figure 3.4.

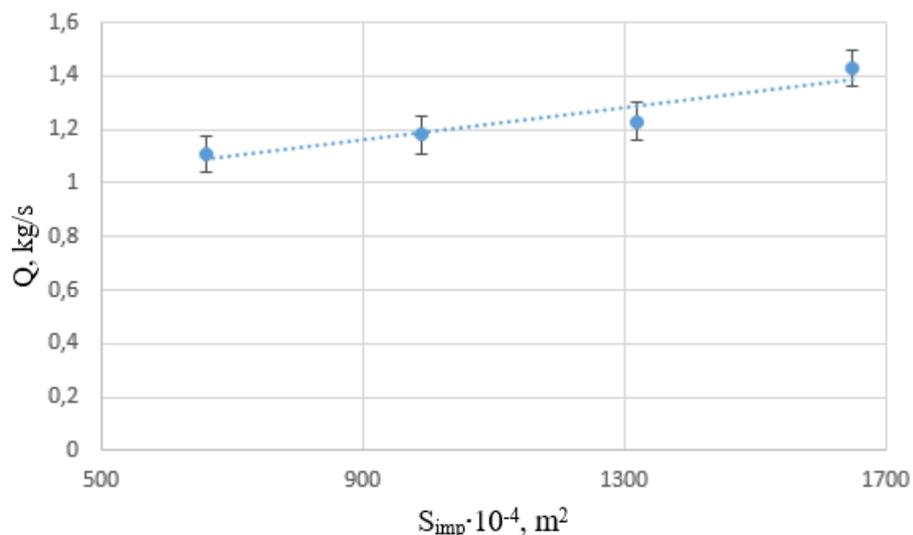


Figure 3.4 - The effect of the input area of the reactor impeller on the flow of plasma-forming gas through the reactor

Based on all of the above, it can be concluded that it is possible to smoothly adjust the mass flow of plasma-supporting gas through the reactor by changing the number of closed sections of the impeller.

3.4 Investigation of the operating modes of HFF-plasma torch

In order to study the operating modes of the plasma torch, thermal power losses on the generator grid and on the anode of the generator lamp are calculated.

The initial power of the air-plasma jet was calculated using the following formula:

$$P_0 = I_a \cdot U_a \quad (3.5)$$

where I_a – current at the anode, A;

U_a – voltage at the anode of the generator lamp, kV.

Next, the power dissipated at the anode in the form of heat was calculated using formula 3.6:

$$P_a = m_a \cdot C_p \cdot \Delta t_a \cdot 4,186 \text{ kWt} \quad (3.6)$$

where m_a – mass flow rate of water, kg/s;

C_p – specific heat of water, kcal/kg;

Δt_a – cooling water temperature difference, deg.

It was also used to determine the power dissipated on the housing, inductance and electrode.

The power of the torch discharge was calculated by the following formula:

$$P_{dis} = P_0 - (P_a + P_g + P_{el}), \text{ kWt} \quad (3.7)$$

The power of the plasma jet was obtained according to the following formula:

$$P_j = P_{dis} - P_c, \text{ кВт} \quad (3.8)$$

To determine the enthalpy of the plasma jet, a certain formula was used that takes into account the flow rate of the plasma-supporting gas and the enthalpy of the gas mixture at a temperature of 300 K:

$$H_T = H_0 + \frac{P_{dis}}{Q_p}, \text{ kJ/kg} \quad (3.9)$$

where H_0 – enthalpy of the gas mixture at a temperature of 300 K;

Q_p – plasma-supporting gas consumption, kg/s.

The efficiency of the plasma torch was calculated by the following ratio:

$$\eta_{pt} = \left(\frac{P_j}{P_{dis}} \right) \cdot 100, \% \quad (3.10)$$

The efficiency of the plasma stand was calculated by the following ratio:

$$\eta_{pt} = \left(\frac{P_j}{P_0} \right) \cdot 100, \% \quad (3.11)$$

The obtained data are given in Appendix B.

The operating mode of the plasma torch was selected in such a way that the temperature of the plasma jet was sufficient to ignite the processed solutions.

3.5 Methods of conducting experiments

In the experiment, model oxide compounds «Nd₂O₃–Sm₂O₃–MgO» were used, simulating the plasmachemical synthesis of dispersion REMIX-fuel, obtained at the speed of rotation of the dispersant rotor $f_d = 35$ Hz and the consumption of recycled process water for the "quenching" of the oxide compounds $Q = 2,8$ kg/s.

Samarium and neodymium were chosen as imitators because they have a similar structure of electronic shells with plutonium and uranium, respectively, which provides similarity in physical-chemical properties.

Salts of neodymium nitrate Nd(NO₃)₃·6H₂O, samarium nitrate Sm(NO₃)₃·6H₂O and magnesium nitrate Mg(NO₃)₂·6H₂O were used for the preparation of WONS.

Based on the results of the conducted studies, the following optimal operating modes of the stand can be recommended for the process of plasmachemical synthesis of fuel oxide compounds:

- high-frequency generator HFG 8-60/13-01 (voltage at the anode 5,6 kV, current at the anode 3,5 A);
- plasma torch (plasma jet power 15,0 kW);
- plasmachemical reactor (mass air flow rate 0,95 kg/s, input area of the impeller 1320 cm²).

To obtain WONS with a given composition, a water nitrate solution (WNS) based on distilled water was initially prepared, to which a combustible organic component (acetone) was added.

After feeding the finished WONS to the rotor of a disperser rotating at a frequency of 35 Hz with a constant flow rate of 300 l/h, their plasma processing was carried out in the reactor at a given temperature, using a pyrometer for temperature control and a wet cleaning unit for quenching oxide compounds and the formation of water suspensions.

After cleaning, the purified gases were released into the atmosphere using an exhaust fan.

Samples were taken from the formed suspensions and sent for granulometric analysis carried out by laser diffraction.

The water suspension was settled for 24 hours, after which the water was drained, and the sediment was filtered and calcined at 120-150 °C for 20 minutes and then transferred for analysis.

3.5.1 Investigation of physical-chemical properties of oxide compounds

To study the properties of the obtained powders of model oxide compounds, an analytical study was conducted on specialized equipment at the Center for collective Use of the Scientific and Educational Innovation Center "Nanomaterials and Nanotechnologies", the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Tomsk Polytechnic University".

The technical parameter D_{50} equal to the median value of the particle size distribution was used for comparative analysis.

The value of the specific surface area was obtained by the BET method conducted with the Sorbi-M device (META CJSC, Russia).

The phase composition of the obtained powders was determined, as well as the hygroscopicity coefficient K , which characterizes the morphology of the particles.

When the hygroscopicity coefficient is less than or equal to one, the shape of the particles is close to equiaxed, and when the hygroscopicity coefficient is higher than one, the particles have a complex surface or internal pores.

From the analysis of the results presented in Appendix C, it follows that an increase in the mass fraction of the matrix (MgO) from 5% to 50% in the composition of OC leads to a decrease in the volume of OC particles from 12 microns to 5.3 microns, and the sizes of crystallites in the conglomerates decrease from 76 nm to 59 nm.

This suggests that the obtained compositions of model oxide compounds consist of nanoscale crystallites.

The results of the conducted research can be applied to create an energy-efficient technology for the production of tolerant REMIX-fuel obtained by plasmachemical synthesis.

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

Студенту:

| | |
|---------------|---------------------------|
| Группа | ФИО |
| 0AM11 | Кузнецову Сергею Юрьевичу |

| | | | |
|---------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 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 250000 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 50000 руб. |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов | Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4,4 баллов из 5 Отчисления во внебюджетные фонды – 30% |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования | 16% накладные расходы; 30% районный коэффициент. |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|---|--|
| 1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ | Описание потенциальных потребителей. Оценка конкурентоспособности НИ. Определение возможных альтернатив проведения НИ. SWOT-анализ. |
| 2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок | Определение структуры выполнения НИ. Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения исследования. Расчет бюджета НИ. |
| 3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности | Определение: интегрального финансового показателя, интегрального показателя ресурсоэффективности, интегрального показателя эффективности. |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

| | |
|---|--|
| 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 | Кузнецов Сергей Юрьевич | | |

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Предпроектный анализ

В настоящее время перспективность научного исследования обуславливается не только важностью разработки в какой-либо сфере деятельности, но и его коммерческой эффективностью.

Оценка коммерческого потенциала разработки является наиболее важным фактором при поиске финансовых источников для реализации научного исследования и его последующей коммерциализации.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности проекта, а также механизмов управления и сопровождения проектных решений на этапе реализации, анализ финансовых аспектов реализации проекта, а также определить экономическую эффективность синтеза дисперсионного ядерного топлива (ДЯТ) в воздушной плазменной струе, а также его последующего внедрения в топливный цикл.

Достижение поставленной цели обеспечивается следующими задачами:

- Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследования;
- Определение возможных альтернатив в процессе проведения исследования удовлетворяющих требованиям ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- Определение ресурсной, финансовой, социальной и экономической эффективностей проведения исследования.

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В России единственным поставщиком ядерного топлива для атомных станций, судовых и исследовательских реакторов является топливная

компания «ТВЭЛ», также российское топливо поставляется за рубеж на реакторы, построенные по отечественным технологиям.

В настоящее время в России используются 7 АЭС, количество энергоблоков на которых с 2010 по 2020 увеличилось с 35 до 38 штук.

С 2007 по 2020 годы выработка электроэнергии на АЭС увеличилась на 50 млрд кВт/ч, а доля ядерной энергетики с 15,9% до 20,28%, а к 2045 году планируется увеличить долю атомной энергетики до 25%.

Дисперсионное ядерное топливо может использоваться как на относительно старых реакторах на тепловых нейтронах типа ВВЭР, так и на новых на быстрых нейтронах типа БН.

Перезагрузка топлива происходит примерно каждые 3–5 лет, и в среднем каждый энергоблок требует топлива порядка 90 тонн в год.

Что позволяет сказать о потенциальной емкости рынка которая составляет порядка 3510 тонн/год.

Текущее керамическое топливо обладает рядом существенных недостатков основным, из которых является низкая теплопроводность, что уменьшает КПД работы реактора, а также приводит к теплонапряжениям топлива, что не безопасно.

Текущее НТИ имеет теплопроводность в разы выше чем керамическое топливо, и зависит от состава ДЯТ, данное преимущество позволяет более эффективно использовать топливо, а значит позволяет повысить КПД реактора, также использование ДЯТ является более безопасным.

Исходя из всего вышперечисленного можно сказать, что даже потребительский рынок России очень перспективный для данной разработки.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Рынок ДЯТ находится в постоянном движении, изменяются как цена на топливо, так и предпочтительный вид топлива, по этим причинам проводить анализ конкурентных разработок на рынке необходимо проводить систематически, что позволит вносить коррективы в процессы проведения и

реализации исследования, в результате чего проект с большей вероятностью окажется перспективней более перспективным, чем у конкурентов.

Оценка перспективности реализации научного проекта осуществляется с помощью определенных показателей, зависящих от объекта исследования, сферы применения объекта исследования, а также технических и экономических особенностей.

Для данной работы выбраны следующие технические критерии оценки перспективности проекта:

- Мобильность – возможность передвижения установок для работы в различных местах;
- Уровень шума
- Наличие отходов – чистота производства;
- Простота в эксплуатации;
- Наличие дорогостоящего оборудования;
- Однородность распределения фаз – в таблетке топливный компонент равномерно распределено в материале матрицы.

Помимо технических критериев, также определены следующие экономические критерии оценки ресурсоэффективности:

- Конкурентоспособность продукта – соотношение сильных и слабых сторон проекта по сравнению с конкурирующими проектами;
- Стоимость реализации проекта – оценка финансовых затрат на реализацию проекта;
- Трудоемкость – количество времени, затрачиваемого на производство единицы продукции;
- Финансирование научной разработки – поддержка государством или инвесторами.

В таблице 4.1 приведена оценочная карта сравнения конкурентных технических решений.

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.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

| Критерии оценки | Вес критерия | Баллы | | | Баллы с учетом весового коэффициента | | |
|---|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|-------------|------------|
| | | Вар. 1 | Вар. 2 | Вар. 3 | Вар. 1 | Вар. 2 | Вар. 3 |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности | | | | | | | |
| Мобильность | 0,02 | 1 | 3 | 5 | 0,02 | 0,06 | 0,1 |
| Уровень шума | 0,04 | 3 | 4 | 4 | 0,12 | 0,16 | 0,16 |
| Наличие отходов | 0,2 | 5 | 3 | 3 | 1 | 0,6 | 0,6 |
| Простота эксплуатации | 0,03 | 3 | 3 | 5 | 0,09 | 0,09 | 0,15 |
| Наличие дорогостоящего оборудования | 0,07 | 3 | 3 | 5 | 0,21 | 0,21 | 0,35 |
| Однородность распределения фаз | 0,02 | 5 | 4 | 2 | 1 | 0,8 | 0,4 |
| Экономические критерии оценки эффективности | | | | | | | |
| Конкурентоспособность | 0,12 | 4 | 4 | 3 | 0,48 | 0,48 | 0,36 |
| Стоимость реализации | 0,04 | 3 | 4 | 5 | 0,12 | 0,16 | 0,2 |
| Финансовая эффективность научной разработки | 0,2 | 4 | 5 | 4 | 0,8 | 1 | 0,8 |
| Трудоемкость | 0,08 | 4 | 5 | 1 | 0,32 | 0,4 | 0,08 |
| Итого | 1 | 35 | 38 | 37 | 4,16 | 3,96 | 3,2 |

где вариант 1 – плазмохимический синтез, вариант 2 – самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), вариант 3 – механическое смешивание.

Анализируя таблицу 4.1 можно сделать вывод о том, что без учета весового коэффициента механическое смешение получается самым оптимальным методом получения ДЯТ, а плазмохимический синтез наименее перспективным.

Однако проведя расчет с использованием весовых коэффициентов видна абсолютно противоположная ситуация, наиболее перспективным методом

синтеза ДЯТ является плазмохимический синтез, а наименее – механическое смешивание оксидов, это происходит потому что преимущества, которые имеют методы СВС и механическое смешивание менее важны и соответственно имеют меньшие весовые коэффициенты, чем критерии, в которых плазмохимический синтез более предпочтителен.

Исходя из чего можно сделать вывод о том, что наиболее предпочтительным методом для синтеза ДЯТ является плазмохимический синтез оксидов.

4.1.3 SWOT-анализ

Для описания проекта можно применить SWOT-анализ. SWOT является мнемонической аббревиатурой и расшифровывается как strengths (сильные стороны), weakness (слабые стороны), opportunities (возможности), threats (угрозы). То есть SWOT-анализ — это анализ сильных и слабых сторон, а также влияния внешней среды

В таблице 4.2 приведена матрица SWOT-анализа проекта.

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

| | | |
|--|--|---|
| | <p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Одностадийность получения ДЯТ;</p> <p>С2. Невысокая стоимость переработки сырья.</p> <p>С3. Гомогенное распределение фаз в продукте с заданным стехиометрическим составом.</p> <p>С4. Возможность влияния на морфологию частиц.</p> <p>С5. Наличие необходимого оборудования для проведения испытаний предлагаемой технологии.</p> <p>С6. Маленький срок получения результатов при проведении научного исследования.</p> | <p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки.</p> <p>Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных специалистов.</p> <p>Сл3. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ.</p> <p>Сл4. Работа с модельными композициями.</p> <p>Сл5. Большое количество возможных вариантов композиций.</p> |
|--|--|---|

Продолжение таблицы 4.2

| | | |
|--|--|--|
| <p>Возможности: В1. Увеличение отходов ядерного производства. В2. Уменьшение количества урана-235. В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт. В4. Повышение стоимости конкурентных разработок. В5. Использование научно-исследовательских достижений ТПУ.</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»: 1. Данным методом можно перерабатывать ОЯТ, что уменьшит количество отходов. 2. Россия обладает сравнительно небольшими запасами урана-235, поэтому в недалеком будущем необходимо будет менять/усовершенствовать используемую технологию производства ЯТ. 3. В случае успеха удастся переработать часть захороненного топлива. 4. При благоприятном раскладе станет возможным строительство ядерных энергоустановок четвертого поколения.</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»: 1. Повышение спроса на данную продукцию обеспечит приток кадров. 2. Использование научно-исследовательского потенциала ТПУ позволит подобрать необходимую композицию.</p> |
| <p>Угрозы: У1. Развитая конкуренция технологии производства. У2. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У3. Неудача эксперимента. У4. Несвоевременное финансовое обеспечение.</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»: 1. Качественные преимущества нового ДЯТ создают хорошую конкуренцию используемым методам производства ЯТ. 2. Такие факты, как нехватка урана-235 и необходимость сокращения отходов прошлых лет, обеспечат спрос на новые технологии производства ЯТ. 3. Наличие оборудования, необходимого сырья, множества различных композиций обещают продолжение эксперимента в случае неудачи с отдельной композицией или в случае прекращения финансирования.</p> | <p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»: 1. Отсутствие данной, новой в своем роде, разработки может обернуться провалом без должного финансирования.</p> |

Проанализировав таблицу 4.2 можно сделать вывод о том, что слабые стороны проекта представляют определенную угрозу, однако исходя из сильных сторон проекта данные угрозы можно применить на пользу проекта.

Самой сильной стороной проекта является превосходство получаемого топлива над используемым в текущее время.

Самой слабой – необходимость в материально-технической базе, и наличии финансовой поддержки.

4.2 Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание, фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на результат проекта.

4.2.1 Цели и результат проекта

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые учувствуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты в ходе исполнения или в результате завершения проекта

Таблица 4.3 – Заинтересованные стороны проекта

| Заинтересованные стороны проекта | Ожидания заинтересованных сторон |
|---|--|
| Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» | Создание технологии получения более эффективного и/или дешевого ядерного топлива |
| ООО «ГРАНХИМ» | Наличие постоянного закупщика химических веществ |
| НИИ «ТПУ» | Возможное получение разрешений и или финансирования на дальнейшие исследования в области ДЯТ |

Таблица 4.4 – Цели и результаты проекта

| | |
|--|--|
| Цели проекта: | Определение перспективности проекта, а также механизмов управления и сопровождения проектных решений на этапе реализации, анализ финансовых аспектов реализации проекта, а также определить экономическую эффективность синтеза дисперсионного ядерного топлива в воздушной плазменной струе, а также его последующего внедрения в топливный цикл. |
| Ожидаемые результаты проекта | Получаемые топливные таблетки должны быть более дешевыми и эффективными чем используемые в настоящее время аналоги |
| Критерии приемки результата проекта | Более низкая себестоимость |
| | Более высокая теплопроводность |
| Требования к результату проекта | Теплопроводность не менее 5 кДж(м·К) |
| | Равномерное распределение фаз в таблетке |
| | Себестоимость твэла на 1 кг урана не более 17.000 руб. [16] |

4.2.2 Организационная структура проекта

В ходе выполнения проекта задействован ряд специалистов роль и функции которых указаны в таблице 4.5

Таблица 4.5 – Рабочая группа проекта

| № п/п | ФИО, основное место работы, должность | Роль в проекте | Функции | Трудозатраты, час. |
|-------|---------------------------------------|----------------|---|--------------------|
| 1 | Каренгин Александр Григорьевич | Руководитель | Составлении плана работ, контроль за исполнением, оценка результатов | 80 |
| 2 | Кузнецов Сергей Юрьевич | Инженер | Подготовка к проведению работ, проведение исследований, составление отчета о проделанной работе | 490 |

4.2.3 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это факторы которые могут послужить ограничением степени свободы участников проекта.

Ограничения проекта приведены в таблице 4.6

Таблица 4.6 – Ограничения проекта

| Фактор | Ограничения |
|--|--------------------|
| 3.1 Бюджет проекта | 250000 руб. |
| 3.1.1 Источники финансирования | ТПУ |
| 3.2 Сроки проекта: | 3 Месяца |
| 3.2.1 Дата утверждения плана управления проектом | 01.05.23 |
| 3.2.2 Дата завершения проекта | 10.07.23 |
| 3.3 Прочие ограничения | - |

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1 Контрольные события проекта

События их даты и результаты приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Контрольные события проекта

| № п/п | Контрольное событие | Дата | Результат |
|--------------|---|-------------|--|
| 1 | Составление ТЗ | 18.05.23 | ТЗ |
| 2 | Подбор и изучение литературных источников | 01.06.23 | Написана обзорная глава диссертации |
| 3 | Подготовка и проведение экспериментов | 01.07.23 | Получен образец оксидного порошка |
| 4 | Анализ полученных порошков | 10.07.23 | Проанализированы физико-химические свойства полученных порошков, написана практическая глава диссертации |
| 5 | Подведение итогов | 31.07.23 | Отчет о проделанной работе |

4.3.2 План проекта

Календарный план проекта приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Календарный план проекта

| Код работы | Название | Длительность, дни | Дата начала работ | Дата окончания работ | Состав участников |
|-------------------|---|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | Постановка целей и задач, получение исходных данных | 3 | 01.05.23 | 03.05.23 | Руководитель, инженер |
| 2 | Составление и утверждение ТЗ | 12 | 04.05.23 | 15.05.23 | Руководитель |
| 3 | Изучение принципов работы оборудования | 17 | 04.05.23 | 20.05.23 | Инженер |

Продолжение таблицы 4.8

| | | | | | |
|---------------|---|----|----------|----------|-----------------------|
| 4 | Подбор и изучение материалов по тематике | 5 | 21.05.23 | 25.05.23 | Руководитель, инженер |
| 5 | Обсуждение литературы | 6 | 26.05.23 | 31.05.23 | Руководитель, инженер |
| 6 | Разработка модели | 11 | 01.06.23 | 11.06.23 | Руководитель, инженер |
| 7 | Определение адекватности модели | 5 | 12.06.23 | 16.06.23 | Руководитель, инженер |
| 8 | Проведение экспериментов | 6 | 17.06.23 | 22.06.23 | Руководитель, инженер |
| 9 | Изучение полученных результатов | 6 | 23.06.23 | 28.06.23 | Инженер |
| 10 | Оформление расчетно-пояснительной записки | 3 | 29.06.23 | 01.07.23 | Инженер |
| 11 | Оформление графического материала | 3 | 02.07.23 | 04.07.23 | Инженер |
| 12 | Подведение итогов | 6 | 05.07.23 | 10.07.23 | Руководитель, инженер |
| Итого: | | 71 | 01.05.23 | 10.07.23 | |

Календарный график-план проекта приведен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Календарный план-график проекта

| Код работы | Название | Исполнители | Тк, кал, дн | Продолжительность выполнения работ | | | | | | | | | | |
|------------|---|-----------------------|-------------|------------------------------------|---|---|------|---|---|------|---|---|---|---|
| | | | | Май | | | Июнь | | | Июль | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | Постановка целей и задач, получение исходных данных | Руководитель, инженер | 3 | ■ | | | | | | | | | | |
| 2 | Составление и утверждение ТЗ | Руководитель | 12 | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| 3 | Изучение принципов работы оборудования | Инженер | 17 | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| 4 | Подбор и изучение материалов по тематике | Руководитель, инженер | 5 | | | ■ | ■ | | | | | | | |
| 5 | Обсуждение литературы | Руководитель, инженер | 6 | | | | ■ | ■ | | | | | | |
| 6 | Разработка модели | Руководитель, инженер | 11 | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | |
| 7 | Определение адекватности модели | Руководитель, инженер | 5 | | | | | ■ | ■ | | | | | |
| 8 | Проведение экспериментов | Руководитель, инженер | 7 | | | | | | ■ | ■ | | | | |
| 9 | Изучение полученных результатов | Инженер | 6 | | | | | | | ■ | ■ | | | |
| 10 | Оформление расчетно-пояснительной записки | Инженер | 3 | | | | | | | | ■ | | | |
| 11 | Оформление графического материала | Инженер | 3 | | | | | | | | | ■ | | |
| 12 | Подведение итогов | Руководитель, инженер | 6 | | | | | | | | | | ■ | ■ |

■ – Руководитель, ■ – инженер

4.3.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета использовались следующие статьи затрат:

- Материалы;
- Спецоборудование для научных и экспериментальных работ;
- Затраты на оплату труда работников;
- Отчисления во внебюджетные фонды;
- Прочие прямые расходы;
- Накладные расходы.

Данные расходы являются прямыми поэтому их следует определять прямым счетом, остальные же затраты рассчитываются косвенным способом, они не связаны с непосредственным выполнением НТИ [15].

4.3.3.1 Расчет материальных затрат

Проект выполнялся с помощью плазмотрона, расчеты и моделирование проводились на компьютере.

Таблица 4.10 – Материальные затраты

| Наименование | Марка, размер | Кол-во | Цена за единицу, руб | Сумма, руб |
|-------------------------------------|---|--------|----------------------|------------|
| Бумага формата А4 | SvetoCopy Classic А4, 500 листов | 1 | 390 | 390 |
| Картридж для принтера | Sactus 44469809, черный | 1 | 980 | 980 |
| Ацетон | АЦЕТОН: Объем - 500 мл | 1,3 | 307 | 400 |
| Нитрат неодима | Неодим азотнокислый (нитрат) 6-водный ХЧ 99,99% | 1 | 11900 | 11900 |
| Всего за материалы | | | | 13670 |
| Транспортно-заготовительные расходы | | | | 684 |
| Итого по статье C_m | | | | 14354 |

4.3.3.2 Затраты на спецоборудование

Таблица 4.11 – Затраты на спецоборудование для научных работ

| № | Наименование оборудования | Кол-во, шт. | Срок полезного использования, лет | Цены единицы оборудования, руб. | Общая стоимость оборудования, руб. |
|---------------|--|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1 | Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01 | 1 | 15 | 10000000 | 10000000 |
| 2 | Персональный компьютер | 2 | 3 | 45000 | 90000 |
| Итого: | 10090000 | | | | |

Норма амортизации рассчитывается по формуле 4.2:

$$H_A = \frac{1}{n} \quad (4.2)$$

где n – срок полезного использования, лет.

Амортизация рассчитывается по формуле 4.3:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot t \quad (4.3)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.;

t – время использования, мес.

Рассчитаем амортизацию плазменного модуля на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01, учитывая, что срок полезного использования 15 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{15} = 0,06$$

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

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

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ 8-60/13-01:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0,06 \cdot 10000000}{12} \cdot 3 = 150000 \text{ руб.}$$

Так как модуль не используется другими командами для проведения исследований, то и отчисления учитываются полностью.

Персональный компьютер:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0,33 \cdot 10000000}{12} \cdot 3 = 3713 \text{ руб.}$$

Так как время работы на ПК составляет порядка 2-х часов в день, а остальное время он используется другими пользователями то возьмем коэффициент равный 0,25

$$A = 3713 \cdot 0,25 = 929 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 150000 + 929 = 150929 \text{ руб.}$$

4.3.3.3 Затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования

Статья включает основную заработную плату работников (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.4)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

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

1) Оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, старший преподаватель, доцент, профессор.

2) Стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д. 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 выполнение темы:

$$Z_{доп} = K_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (4.5)$$

где $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата в рублях;

$K_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{осн}$ – основная заработная плата в рублях.

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по формуле:

$$Z_{осн} = T_{раб} \cdot Z_{дн} \quad (4.6)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником в рабочих днях;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника в рублях.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 4.7:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{T_{\partial}} \quad (4.7)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

T_{∂} - действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней (таблица 4.12).

а) при отпуске в 24 раб.дн. количество месяцев работы без отпуска составляет

$M = 11,2$ месяца при 5-дневной рабочей неделе;

б) при отпуске в 48 раб.дн. количество месяцев работы без отпуска составляет

$M = 10,4$ месяца при 6-дневной рабочей неделе.

Таблица 4.12 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Руководитель | Инженер |
|--|--------------|---------|
| Календарное число дней | 365 | 365 |
| Количество нерабочих дней (выходные, праздники): | 66 | 118 |
| Отпуск, невыходы по болезни | 70 | 28 |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 229 | 219 |

Инженер ежемесячно получает заработную плату в размере 13500 руб. Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда.

Для расчёта месячного должностного оклада работника применяется формула:

$$Z_m = Z_б \cdot (k_{пр} + k_д) \cdot k_p \quad (4.8)$$

где $Z_б$ – заработная плата по окладу, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент;

$k_д$ – коэффициент доплат и надбавок;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3.

Руководителем является доцент ИЯТШ Томского политехнического университета с окладом 35000. Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Расчёт основной заработной платы

| Исполнители | $Z_{ок}$, руб. | $k_{пр}$ | $k_д$ | k_p | Z_m , руб. | $Z_{дн}$, руб. | $T_{раб}$, дн | $Z_{осн}$, руб. |
|-----------------|-----------------|----------|-------|-------|--------------|-----------------|----------------|------------------|
| Руководитель | 35000 | 1,0 | 1,0 | 1,3 | 45500 | 2067 | 11 | 22737 |
| Инженер | 13500 | | | | 17550 | 834 | 16 | 13344 |
| Итого $Z_{осн}$ | | 36081 | | | | | | |

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

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10 – 15 % от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Примем коэффициент дополнительной заработной платы равным 13 %. Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

| Заработная плата | Руководитель | Инженер |
|---|--------------|---------|
| Основная зарплата | 22737 | 13344 |
| Дополнительная зарплата, руб. | 2956 | 1735 |
| Затраты на оплату труда исполнителя, руб. | 25693 | 15079 |
| Итого по статье Сзп, руб. | 40772 | |

Таким образом в разделе рассчитаны затраты на оплату труда исполнителей научно-технического исследования. Заработная плата руководителя – 25693 руб, а инженера – 15079 рублей. Суммарная заработная плата исполнителей составила 40772 рублей.

4.3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Страховые взносы – это 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:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (4.9)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Общая ставка взносов составляет в 2023 году – 30 %.

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

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot 25693 = 7708 \text{ руб.}$$

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

$$Z_{внеб} = 0,3 \cdot 15079 = 4524 \text{ руб.}$$

В результате расчётов были определены отчисления во внебюджетные фонды от затрат на оплату труда руководителя и инженера, при том что коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды составил 0,3. Для руководителя, отчисления составили 7708 руб., а для инженера 4524 рублей.

4.3.3.5 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хоз. инвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров [15].

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

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

где $k_{накл}$ – коэффициент накладных расходов, равный 0,16.

Накладные расходы составят:

$$C_{накл} = 0,16 \cdot 40772 = 6524 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости синтеза ДЯТ, приведенной в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Группировка затрат по статьям

| Статьи | | | | | | | |
|-------------|------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Амортизация | Сырье, материалы | Основная заработная плата | Дополнительная заработная плата | Отчисления на социальные нужды | Итого без накладных расходов | Накладные расходы | Итого бюджетная стоимость |
| 150929 руб. | 13670 руб. | 36081 руб. | 4691 руб. | 12232 руб. | 217603 руб. | 6524 руб.. | 224127 руб. |

В итоге бюджетная стоимость составила 224127 рубля. В эту стоимость входят: амортизация, стоимость сырья, материалов, основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления на социальные нужды и

накладные расходы, которые составили 6524 рублей при коэффициенте накладных расходов 0,16.

4.4 Определение ресурсной эффективности проекта

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле 4.11:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.11)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности данного исследования представлен в форме таблицы 4.16.

Таблица 4.16 – Сравнительная оценка характеристик исполнения проекта

| Критерии | Весовой коэффициент параметра | Вар. 1 | Вар. 2 | Вар. 3 |
|---|-------------------------------|--------|--------|--------|
| 1. Способствует росту производительности труда пользователя | 0,15 | 3 | 4 | 4 |
| 2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей) | 0,15 | 4 | 3 | 2 |
| 3. Помехоустойчивость | 0,05 | 4 | 4 | 4 |
| 4. Энергосбережение | 0,1 | 4 | 3 | 5 |
| 5. Надежность | 0,3 | 5 | 4 | 4 |
| 6. Материалоемкость | 0,25 | 4 | 5 | 4 |
| Итого I | 1 | 4,15 | 4 | 3,8 |

Вариант 1 – используются оксиды металла и ацетон, вариант 2 – используются нитрид металла и этанол, вариант 3 – используются металлы и метанол.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_i}{\Phi_{max}} \quad (4.12)$$

где Φ_i – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения НТИ (в т.ч. аналоги).

$$I_{\phi}^p = \frac{\phi_i}{\phi_{max}} = \frac{256504}{300000} = 0,855$$

$$I_{\phi}^{a1} = \frac{270104}{300000} = 0,9$$

$$I_{\phi}^{a2} = \frac{248104}{250000} = 0,992$$

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

$$I_{финр}^p = \frac{I^p}{I_{\phi}^p} \quad (4.13)$$

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

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

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_p}$$

Таблица 4.17 – Сравнительная эффективность разработки

| Показатели | Аналог 1 | Аналог 2 | Разработка |
|---|----------|----------|------------|
| Интегральный финансовый показатель разработки | 0,900 | 0,99 | 0,85 |
| Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки | 3,8 | 4,0 | 4,0 |
| Интегральный показатель эффективности | 4,22 | 4,03 | 4,67 |
| Сравнительная эффективность вариантов исполнения | 1,11 | 1,01 | 1,17 |

Аналог 1 – механическое смешивание, аналог 2 – самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

На основе расчета интегрального показателя с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и

ресурсоэффективности научного исследования можно заключить что, сравнительная оценка текущего проекта выше других аналогов.

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы –71 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 59 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель –42;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 224127 руб.;

4. По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

– Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,855, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;

– Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4, по сравнению с 4 и 3,8;

Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,68, по сравнению с 4,03 и 4,22, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | |
|---------------|-------------------------|
| Группа | ФИО |
| 0AM11 | Кузнецов Сергей Юрьевич |

| | | | |
|----------------------------|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Школа | ИЯТШ | Отделение (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: Процесс плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций «PuO ₂ -UO ₂ -MgO» из водно-органических нитратных растворов для толерантного REMIX-топлива 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"> – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 19.12.2022); |
| 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"> – отклонение показателей микроклимата; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень шума; – психофизиологические факторы; – опасность поражения электрическим током. |
| 4. Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях: | <ul style="list-style-type: none"> – выбор и описание типичной АСиЧС – пожар, удар током, падение с высоты собственного роста; – обоснование мероприятий по предотвращению АСиЧС; – порядок действий при возникновении АСиЧС. |

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|---------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 0AM11 | Кузнецов С.Ю. | | |

5 Социальная ответственность

Целью выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) является теоретическое и экспериментальное исследование процесса плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций в воздушной плазме для толерантного REMIX-топлива. В работе проводится изучение процесса синтеза в воздушной плазме оксидных композиций для ядерного топлива.

Выполнение ВКР проводилось в отделении ядерно-топливного цикла (ОЯТЦ) Инженерной школы ядерных технологий (ИЯТШ) Томского политехнического университета. Для выполнения теоретической части ВКР в качестве рабочего места использовался компьютерный стол с ЭВМ, соответствующее периферийное оборудование (монитор, клавиатура, мышь) и программное обеспечение (Microsoft Word, Microsoft Excel, TERRA). Для выполнения экспериментальной части ВКР в качестве рабочего места использовалась установка «Плазменный модуль на базе ВЧФ-плазмотрона». (лаборатория № 001А–10 учебный корпус ТПУ).

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

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Исследования и расчёты проводились с применением ЭВМ, также использовался ВЧФ-плазменный стенд с использованием высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01. Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

В таблице 5.1 представлены основные виды работ, которые могут привести к воздействию опасных и вредных факторов.

Таблица 5.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы [26]

| Наименование видов работ и параметров производственного процесса | Факторы | | Нормативные документы |
|--|---|--------------------|---|
| | Вредные | Опасные | |
| Работа с химическими реактивами. | Химические вредные вещества. | – | ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества [20]. |
| Работа на плазменной установке. | Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.). | Электрический ток | ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [21], СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона [22]. |
| | | Пожарная опасность | ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность [23]. |
| Расчёт данных на ЭВМ. | Шум, вибрация, микроклимат; воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и т.д.). | Электрический ток | ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [21]. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [24], СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [26] |

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

- физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, электромагнитное поле низкой частоты, освещенность, наличие излучения;
- химические: вредные вещества (этанол, оксиды: самария, иттрия, магния, углерода);
- психофизиологические: физическая перегрузка (статическая, динамическая), нервно-психические перегрузки (умственные перегрузки,

перегрузки анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки) [26].

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ВЧФ-плазмотроне и ПЭВМ

В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ и ВЧФ-плазматрона [26] они должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ должна составлять не менее 6 м².

Основные параметры, характеризующие условия труда – это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

5.2.1 Организационные мероприятия

Персонал обязан знать и соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом [26].

5.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации.

То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1 [25].

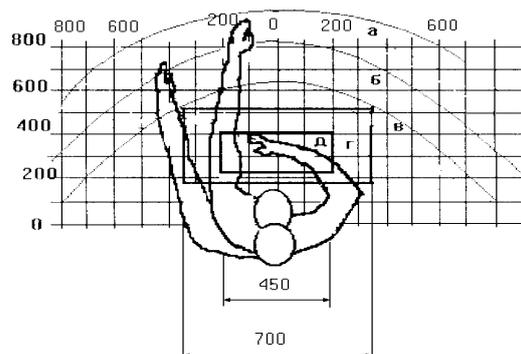


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне, а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация – в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно [25].

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680 – 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм. Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки [25].

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной

плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [25].

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях [25].

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека [25].

5.2.3 Микроклимат

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [26] и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оптимальные параметры микроклимата в помещении

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

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию [26]. Параметры микроклимата, в используемой лаборатории № 001А–10 учебного корпуса ТПУ, регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура – 20-23 °С.

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. Оптимальная кратность воздухообмена в производственных помещениях находится в достаточно широких пределах: от 3 до 40 раз в час [26]. В используемой лаборатории установлен высоконапорный вытяжной вентилятор марки ВР-12-26-4 производительностью $Q = 2400 - 4400 \text{ м}^3/\text{час}$.

Объем лаборатории составляет:

$$V = a \cdot b \cdot h = 6 \cdot 12 \cdot 7 = 504 \text{ м}^3. \quad (5.1)$$

Данный вентилятор обеспечивает следующую кратность воздухообмена (ВО) в лаборатории:

$$BO = \frac{Q}{V} = \frac{2400 \div 4400}{504} = 4,8 \div 8,7 \quad (5.2)$$

Таким образом установлено, что микроклимат в используемой лаборатории № 001А–10 учебного корпуса ТПУ соответствует оптимальным условиям работы [26].

5.2.4 Шум и вибрация

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь

организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне [24].

В нашем случае источником шума является откачивающий компрессор. Уровень шума компрессора менее 55 дБ, что соответствует санитарным нормам [24]. Шум на рабочем месте может быть вызван работой ЭВМ. Уровень шума ЭВМ лежит в пределах 30-40 дБ, что также соответствует нормам.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов);
- применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения [24].

Средства индивидуальной защиты: применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны [28].

Таким образом установлено, что шум и вибрация в используемой лаборатории № 001А–10 учебного корпуса ТПУ соответствует оптимальным условиям работы [24].

5.2.5 Электромагнитное излучение

Электромагнитное излучение – распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. ВЧФ-плазматрон питается от генератора высокочастотного тока. Генератор

полностью экранирован. Предельно допустимая величина электромагнитного воздействия от установки на человека составляет менее 0,2 мкТл. Это значение входит в допустимый порог строгих санитарных норм электромагнитного излучения [22].

Экран и системные блоки ЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна соответствовать допустимым уровням параметров электромагнитного поля (таблица 5.3) [22].

Таблица 5.3 – Допустимые уровни параметров электромагнитного поля

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

Таким образом установлено, что в лаборатории № 001А–10 учебного корпуса ТПУ уровень электромагнитного излучения соответствует санитарным нормам [22].

5.2.6 Освещенность

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

Согласно [26] в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном

нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 300 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда [26]. Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки [28].

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина рабочего помещения $A = 6$ м, ширина $B = 6$ м, высота $H = 3,5$ м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1,0$ м. Согласно [26] необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь рабочего помещения:

$$S = A \cdot B = 6 \cdot 6 = 36 \text{ м}^2, \quad (5.3)$$

где A – длина, м; B – ширина, м.

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c = 50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_n = 70\%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_z = 1.5$. Коэффициент неравномерности для светодиодных лент $Z = 1.1$.

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

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

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

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

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

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

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

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

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

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

Из формулы:

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

Найдем число светодиодных лент N :

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

η определяем через индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a+b)} = \frac{6 \cdot 6}{2 \cdot (6+6)} = 1,5. \quad (5.8)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа Diora со светодиодными лентами при $\rho_{п} = 70\%$, $\rho_{с} = 50\%$, и индексе помещения $i = 1,5$ равен $\eta = 0,52$.

Тогда:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{л} \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 36 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2900 \cdot 0,52} = 11,81 \text{ лент.}$$

Принимаем количество светодиодных лент 12. При этом получается 6 светильников, т.е. 2 ряда по 3 светильника.

Потребный световой поток светодиодных ламп:

$$\Phi_{л} = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 36 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,52} = 2856 \text{ Лм.}$$

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

$$6000 = L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + 2 \cdot 124, \text{ где } L_1 = 3451 \text{ мм, } \frac{L_1}{3} = 1150 \text{ мм.} \quad (5.9)$$

$$6000 = L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_2 + 3 \cdot 124, \text{ где } L_2 = 832 \text{ мм, } \frac{L_2}{3} = 277 \text{ мм.} \quad (5.10)$$

На рисунке 5.2 изображен план помещения и размещения светильников со светодиодными лентами лаборатории № 001А–10 корпуса ТПУ.

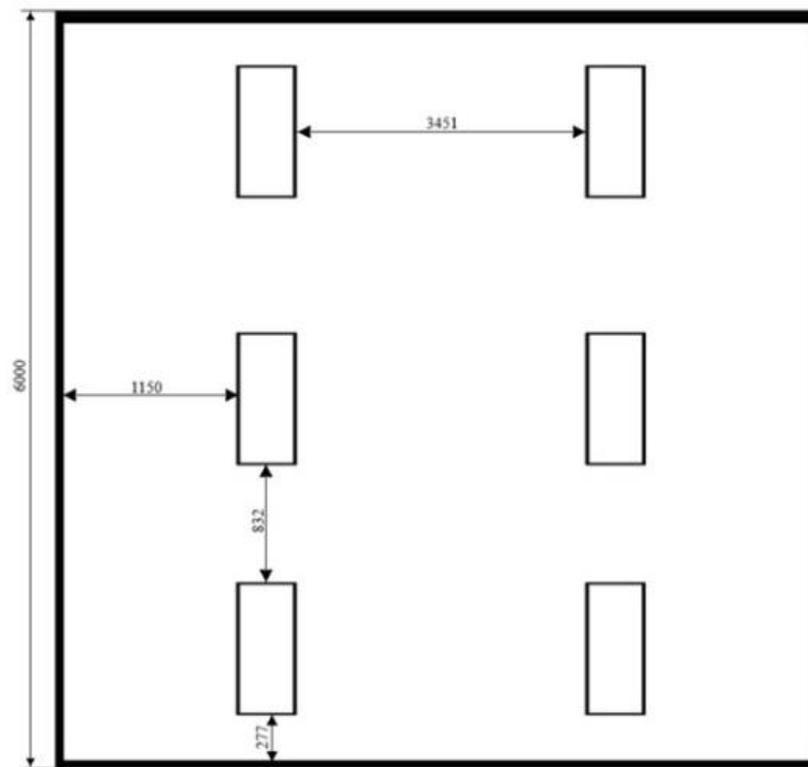


Рисунок 5.2 – План помещения и размещения светильников со светодиодными лентами

Делаем проверку выполнения условия:

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

$$\frac{\Phi_{лд} - \Phi_{л}}{\Phi_{лд}} \cdot 100\% = \frac{2900 - 2856}{2900} \cdot 100\% = 1,5\%.$$

Следовательно, необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Мощность осветительной установки получилась:

$$P = 12 \cdot 9 = 108 \text{ Вт.}$$

Расчётное количество светильников соответствует установленным в помещении 001А–10 корпуса ТПУ [26].

5.2.7 Психофизиологические факторы

Трудовая деятельность работников непроизводственной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента и т.д. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает функциональную активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развития утомления, переутомления, стрессу [26].

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [26].

5.3 Химическая безопасность

При эксплуатации ВЧФ плазмотрона в окружающую среду выбрасываются вредные газообразные вещества, такие как оксиды азота и углерода, с концентрацией, не превышающей предельно допустимых значений.

В таблице 5.4 приведены предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности [27].

Классы опасности:

- 1 – вещества чрезвычайной опасности;
- 2 – вещества высоко опасные;
- 3 – вещества умеренно опасные;
- 4 – вещества мало опасные [27].

Таблица 5.4 – Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности

| № | Вещество | ПДК, мг/м ³ | Класс опасности |
|---|---------------|------------------------|-----------------|
| 1 | Оксид самария | 4,00 | 3 |
| 2 | Оксид магния | 3,00 | 3 |
| 3 | Ацетон | 0,35 | 2 |

Вентиляция обеспечивает санитарно-гигиенические условия (температуру, относительную влажность, скорость движения воздуха и чистоту воздуха) воздушной среды в помещении, благоприятные для здоровья и самочувствия человека, отвечающие требованиям санитарных норм, технологических процессов, строительных конструкций зданий, технологий хранения и т. д. Система вентиляции на плазматроне осуществляется с помощью специальных движимых лопастей. Скорость потока воздуха через газоход (вентиляцию) равна 18,76 м/с.

При работе использовались следующие средства индивидуальной защиты: резиновые перчатки [28], лабораторный халат [28], респиратор «лепесток» [28].

5.4 Электробезопасность

Рабочее помещение по опасности поражения электрическим током можно отнести ко 2 классу, т.е. это помещение без повышенной опасности из-за возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой [21].

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- 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 [21].

Степень опасного воздействия электрического тока на организм человека зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути прохождения тока через тело человека;
- продолжительности воздействия на организм человека;
- условий внешней среды [26].

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие [21].

Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов и других органов, в результате чего в них возникают функциональные расстройства [21].

Электролитическое действие тока характеризуется разложением крови и других органических жидкостей, что вызывает нарушения их физико-химического состава [21].

Механическое действие тока проявляется в повреждениях (разрыве, расслоении и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта [21].

Биологическое действие тока на живую ткань выражается в опасном возбуждении клеток и тканей организма, сопровождающемся произвольными судорожными сокращениями мышц. В результате такого

возбуждения может возникнуть нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения [26].

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются [21]:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год [26].

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

При выполнении данной ВКР применен плазменный стенд с использованием высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01. Данный генератор питается от сети с промышленным напряжением 380 В, с анодным напряжением 10,4÷10,5 кВ и номинальной потребляемой мощностью 60 кВт.

При использовании данного оборудования строго выполнялись требования по электробезопасности, все операции выполнялись руководителем, имеющим допуск до работ с напряжениями свыше 1000 В.

5.5 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 [23]. Так как помещение лаборатории по степени пожаро-взрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины возгорания [23]:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов.

Наиболее опасным с точки зрения пожарной безопасности веществом, применяемым в работе, является этанол.

Все работы с ацетоном должны проводиться с использованием приточно-вытяжной вентиляции вдали от огня и источников искрообразования.

Для тушения горящего ацетона применяют порошковые огнетушители, средства объемного тушения (минимальная огнетушащая концентрация: углекислого газа – 29 % (по объему), азота – 43 % (по объему), дибромтетрафторэтана – 2,1 % (по объему), песок, асбестовое одеяло и пену [23].

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные [23].

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 [23].

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования [26].

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [26]:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- 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 пожара сообщить руководителю, органам противопожарной безопасности предприятия и приступить к тушению пожара огнетушителем.

При возникновении аварийной ситуации необходимо [23]:

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

Таким образом установлено, что пожаро- и взрывобезопасность в используемой лаборатории № 001А–10 учебного корпуса ТПУ соответствует требованиям [23].

5.6 Безопасность в аварийных и чрезвычайных ситуациях

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

Рассмотрены возможные аварийные (АС) и чрезвычайные ситуации(ЧС), методы их предотвращения и ликвидации последствий (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий

| Чрезвычайная ситуация | Методы предотвращения АС и ЧС | Ликвидация последствий АС и ЧС |
|-----------------------|--|---|
| Пожар | Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Соблюдение технологических режимов производства; Создание условий для эвакуации персонала | Вызов пожарной службы и спасателей (тел. 112); Вызов скорой медицинской помощи |
| Удар током | Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Содержание энергетических сетей в исправном состоянии | Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи |

Продолжение таблицы 5.5

| | | |
|---|---|--|
| Травмирование в результате падения с высоты | Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Создание систем предупреждения падений; Соблюдать требования безопасности при выполнении работ на высоте | Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи |
|---|---|--|

Вывод по главе

В данной главе проведен анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований:

- микроклимат [26];
- шум и вибрация [24];
- электромагнитное излучение [22];
- освещенность [26];
- психофизиологические факторы [26];
- химическая безопасность [27];
- электробезопасность [21];
- пожаро-взрывобезопасность [23].

Помещение № 001А–10 корпуса ТПУ отнесено:

- по электробезопасности – к 2 классу [21];
- по пожаро-взрывобезопасности – к категории В [23].

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

Findings

1. As a result of the carried out calculations, the optimal compositions of WONS were determined, ensuring their energy-efficient processing in air plasma.

2. Based on the results of thermodynamic calculations, the regularities of the influence of the air mass fraction on the composition of the resulting products have been established and optimal conditions for the plasmachemical synthesis of fuel oxide compounds «PuO₂ – UO₂ – MgO» of the required composition have been determined:

- air plasma coolant mass fraction is less than 68% with the mass fraction of the matrix (MgO) 5–50%;
- operating temperature 1600±200 K;
- the specific energy consumption for obtaining one kilogram of FOC «PuO₂–UO₂–MgO» is 2,6 – 8,3 MJ/kg.

3. Under the recommended modes, the process of plasmachemical synthesis of model oxide compounds «Nd₂O₃ - Sm₂O₃ – MgO» from dispersed WONS is implemented in the air plasma of the HFF discharge.

4. The physical-chemical properties (elemental composition, particle size) of the obtained powders of model oxide compounds of the required composition are determined. The regularities of the influence of the mass fraction of the matrix (magnesium oxide) on the specific surface area and the size of the obtained OC are established. It is shown that with a constant water consumption for quenching of 2,8 kg/s and the speed of rotation of the disperser of 35 Hz, a change in the mass fraction of the matrix (MgO) from 5 to 50% in the composition of OC leads to a decrease in the size of the formed OC particles from 12,0 microns to 5,3 microns (LD method). The specific surface area of OC and the particle size are in the range of 76-59 nm and 10,2 – 16,1 m²/g (BET), respectively.

Conclusion

The research results can be used to create an energy-efficient technology for the production of tolerant REMIX-fuel obtained by plasmachemical synthesis from water-organic nitrate solutions.

List of publications

1. Karengin A. G., Karengin A. A., Kuznetsov S. Y., Novoselov I. Y., Tikhonov A. E., Golovkov N. I. Plasma-chemical synthesis of nanostructured oxide compounds for accident tolerant fuel // Russian Physics Journal. - 2022 - Vol. 65 - № 4. - p. 677-682. doi: 10.1007/s11182-022-02684-4
2. Karengin A. G., Karengin A. A., Kuznecov S. YU., Novoselov I. YU., Tihonov A. E., Golovkov N. I. Issledovanie processa plazmohimicheskogo sinteza nanostrukturnyh oksidnyh kompozicij dlya tolerantnogo yadernogo topliva // Izvestiya vuzov. Fizika. - 2022 - V. 65 - № 4. - p. 82-87. doi: 10.17223/00213411/65/4/82
3. Karengin A. G., Belyakov D. M., Golovkov N. I., Kuznecov S. YU., Novoselov I. YU. Issledovanie processa plazmohimicheskogo sinteza oksidnyh kompozicij dlya uranovogo dispersionnogo yadernogo topliva // Aktual'nye problemy uranovoj promyshlennosti: sbornik trudov H YUbilejnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 25-letiyu AO «NAK «Kazatomprom» i 20-letiyu TOO «Institut vysokih tekhnologij»: v 2 t., Almaty, 24-26 Noyabrya 2022. - Almaty: KBTU, 2022 - V. 1 - p. 396-400
4. 4. Kuznecov S. YU. Plazmohimicheskij sintez i issledovanie oksidnyh kompozicij iz vodno-organicheskikh nitratnyh rastvorov neodima i magniya // Izotopy: tekhnologii, materialy i primenenie: sbornik tezisov dokladov VII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov, Tomsk, 25-28 Oktyabrya 2021. - Tomsk: [S.n.], 2021 - p. 70
5. Kuznecov S. YU., Karengin A. A., Sunyajkina A. A. Modelirovanie processa plazmohimicheskogo sinteza toplivnyh oksidnyh kompozicij dlya perspektivnyh tipov tolerantnogo MOX-topliva // Izotopy: tekhnologii, materialy i primenenie: sbornik tezisov dokladov VII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov, Tomsk, 25-28 Oktyabrya 2021. - Tomsk: [S.n.], 2021 - p. 79
6. Sunyajkina A. A., Karengin A. A., Kuznecov S. YU. Issledovanie processa plazmohimicheskogo sinteza toplivnyh oksidnyh kompozicij dlya

dispersionnogo REMIX-topliva // Izotopy: tekhnologii, materialy i primeneniye: sbornik tezisov dokladov VII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov, Tomsk, 25-28 Oktyabrya 2021. - Tomsk: [S.n.], 2021 - p. 59

7. Karengin A. A. , Kuznecov S. YU. , Ivanov K. S. Plazmohimicheskij sintez i issledovanie nanorazmernyh oksidnyh kompozicij, modeliruyushchih dispersionnoe REMIX-toplivo // Izotopy: tekhnologii, materialy i primeneniye: sbornik tezisov dokladov VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov, Tomsk, 26-29 Oktyabrya 2020. - Tomsk: TPU, 2020 - p. 44-45

References

1. World Nuclear Association: site. URL: <https://world-nuclear.org/> (date of access: 03.04.2023)
2. Belaya kniga yadernoj energetiki. Zamknutyj YATC s bystryimi reaktorami / pod obshch. red. prof. E.O. Adamova. – M.: Izd-vo AO «NIKIET», 2020. – 502 p. ISBN 978-5-98706-129-9
3. Pol'shikova O.V. Toplivo budushchego: MOKS i REMIKS-toplivo: trudy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskaya konferencii molodyh uchenyh BGTU im. V.G. SHuhova, posvyashchennaya 300-letiyu rossijskoj akademii nauk. – Belgorod, 2022. – pp. 266-299. ISBN: 978-5-361-01020-2
4. Alekseev S.V., Zajcev V.A., Tolstouhov S.S. Dispersionnoe yadernoe toplivo. - M.: Tekhnosfera, 2015. – 256 p. – ISBN 978-5-94836-428
5. Karengin A. G. Plazmennye tekhnika i tekhnologii v yadernom toplivnom cikle: uchebnoe posobie CH. 1. / A. G. Karengin, I. YU. Novoselov, A. A. Karengin. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta–, 2020. – 149 p. – ISBN 978-5-4387-0947-3
6. Karengin A. G. Fizika i tekhnika nizkotemperaturnoj plazmy: uchebnoe posobie – Tomsk: Izd-vo TPU–, 2008. –160 p. – ISBN 5-98298-334-9
7. Tumanov YU.N. Plazmennye i vysokochastotnye processy polucheniya i obrabotki metallov v yadernom toplivnom cikle: nastoyashchee i budushchee. – M.: FIZMATLIT, 2003. – 760 p. ISBN 5-9221-0416-0
8. Vorozhcov A.B. Sintez dispersionnyh metalloksidnyh materialov. Kniga 2. Plazmohimicheskij metod polucheniya oksidov titana i cirkoniya. – Tomsk: Izd-vo NTL, 2014 – 168 p. – ISBN 978-5-89503-549
9. Kotel'nikov R.B. Vysokotemperaturnoe yadernoe toplivo. – M.: Atomizdat, 1978. – 432 p.
10. Leeneers A., et al. Surface engineering of low enriched uranium-molybdenum // J. Nucl. Mater. – 2013. – V. 440. – P. 220
11. Bedenko S. V., Knyshev V. V., Kuznecova M. E., SHamanin I. V. Osobennosti formirovaniya ostatochnogo izlucheniya dispersionnogo

mikrokapsulirovannogo yadernogo topliva // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. YAdernaya energetika. - 2018. - №3. 4.

12. Marihin N. YU., Pimenov V.V., Starkov V. A. Issledovanie harakteristik aktivnoj zony reaktora sm s dispersionnym toplivom i matricej na osnove alyuminievogo splava // Sbornik trudov AO GNC NIAR. - 2014. - №1.

13. Pioro I., Kirillov P.L. Pokolenie IV yadernyh reaktorov kak osnova dlya mirovogo proizvodstva elektrichestva v budushchem // Atomnaya tekhnika za rubezhom. – 2014. – № 2. – p. 3

14. Rylov M.I., Tihonov M.N. YAdernyj i radiacionnyj terrorizm // Atomnaya strategiya XXI. – 2014, iyul'. – № 92. – p. 14.

15. Semenovskaya I.V. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya issledovatel'skih reaktorov v mire // Atomnaya tekhnika za rubezhom. – 2014. – № 1. – p. 1

16. Gavrikova N.A. Finansovyj menedzhment, resursoeffektivnost' i resursosberezhenie: uchebno-metodicheskoe posobie / N.A. Gavrikova, L.R. Tuhvatulina, I.G. Vidyaev, G.N. Serikova, N.V. SHapovalova; Tomskij politekhnicheskij universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2014. – 73p.

17. Trudovoj kodeks Rossijskoj Federacii ot 30.12.2001 №197-FZ (red. ot 19.12.2022, s izm. ot 11.04.2023) (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.03.2023) // Tekhekspert : [Electronic resource]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807664> (date of the application: 15.05.2023).

18. Organizaciya, normirovanie i oplata truda: Uchebnoe posobie / A. S. Golovachev, N. S. Berezina, N. CH. Bokun i dr.; Pod obshch. Red. A. S. Golovacheva. – M.: Novoe znanie, 2004. – 496 p. /Glava 5. – ISBN 978-5-8050-0339-5

19. Pashuto, V. P. Organizaciya, normirovanie i oplata truda na predpriyatii: uchebno-prakticheskoe posobie / V. P. Pashuto. – M: KNORUS, 2005. – 320 p. / Glava 7. – ISBN 978-5-406-05319-5

20. GOST 12.1.007-76 «SSBT. Vrednye veshchestva».

21. GOST 12.1.038-82 «SSBT. Elektrobezopasnost'».
22. SanPiN 2.2.4/2.1.8.055-96 «Elektromagnitnye izlucheniya radiochastotnogo diapazona».
23. GOST 12.1.004-91 «SSBT. Pozharnaya bezopasnost'».
24. SanPin 2.2.4.3359-16 «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k fizicheskim faktoram na rabochih mestah».
25. SanPiN 2.2.2/2.4.1340-03 «Gigienicheskie trebovaniya k personal'nym elektronno-vychislitel'nym mashinam i organizacii rabot».
26. SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya».
27. GN 2.2.5.1313-03 Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) vrednyh veshchestv v vozduhe rabochej zony.
28. GOST 12.4.011-89 «SSBT. Sredstva zashchity rabotayushchih. Obshchie trebovaniya i klassifikaciya».

Appendixes

Appendix A

Table A1 – Composition of WONS for plasmachemical synthesis of fuel oxide compounds «PuO₂–UO₂–MgO» based on acetone

| № | The composition of OC | The composition of WONS, % | | | | | Q _i ^c , MJ/kg |
|---|--|--|---|--|------------------|---------|-------------------------------------|
| | | UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | PuO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | H ₂ O | Acetone | |
| 1 | 95% (PuO ₂ –UO ₂) – 5% MgO | 37,434 | 0,374 | 6,850 | 27,341 | 28,000 | 8,148 |
| 2 | 90% (PuO ₂ –UO ₂) – 10% MgO | 30,501 | 0,305 | 11,784 | 29,410 | | 8,096 |
| 3 | 80% (PuO ₂ –UO ₂) – 20% MgO | 21,004 | 0,210 | 18,258 | 32,529 | | 8,018 |
| 4 | 70% (PuO ₂ –UO ₂) – 30% MgO | 14,892 | 0,149 | 22,191 | 34,768 | | 7,962 |
| 5 | 60% (PuO ₂ –UO ₂) – 40% MgO | 10,681 | 0,107 | 24,758 | 36,454 | | 7,920 |
| 6 | 50% (PuO ₂ –UO ₂) – 50% MgO | 7,629 | 0,076 | 26,525 | 37,770 | | 7,887 |
| 7 | 50% (PuO ₂ –UO ₂) – 50% MgO | 7,629 | 0,076 | 26,525 | 37,770 | | 7,887 |

Table A2 – Comparative table of processing of WONS compositions for plasmachemical synthesis of fuel oxide compounds «PuO₂–UO₂–MgO»

| The composition of FOC | № WONS | The composition of WONS, % | | | | | | Q _{np} , MJ/kg | T _{ad} , K | Composition of products | | |
|---|--------|--|---|--|------------------|--------|--------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------|
| | | UO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | PuO ₂ (NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | H ₂ O | Ацетон | Воздух | | | CO | UO ₂ | U ₃ O ₈ |
| 95% (PuO ₂ –UO ₂) – 5% MgO | WONS-1 | 12,728 | 0,127 | 2,329 | 9,296 | 9,520 | 66 | 8,148 | 1745 | - | + | - |
| | WONS-2 | 11,979 | 0,120 | 2,192 | 8,749 | 8,960 | 68 | | 1654 | - | + | - |
| | WONS-3 | 11,230 | 0,112 | 2,055 | 8,202 | 8,400 | 70 | | 1562 | + | - | + |

Continuation of the table A2

| | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|--------|-------|-------|--------|-------|----|-------|------|---|---|---|
| 90% (PuO ₂ – UO ₂) – 10% MgO | WONS - 4 | 10,370 | 0,104 | 4,006 | 9,999 | 9,520 | 66 | 8,096 | 1736 | - | + | - |
| | WONS - 5 | 9,760 | 0,098 | 3,771 | 9,411 | 8,960 | 68 | | 1644 | - | + | - |
| | WONS - 6 | 9,150 | 0,091 | 3,535 | 8,823 | 8,400 | 70 | | 1553 | + | - | + |
| 80% (PuO ₂ – UO ₂) – 20% MgO | WONS - 7 | 7,141 | 0,071 | 6,208 | 11,060 | 9,520 | 66 | 8,018 | 1720 | - | + | - |
| | WONS - 8 | 6,721 | 0,067 | 5,842 | 10,409 | 8,960 | 68 | | 1630 | - | + | - |
| | WONS - 9 | 6,301 | 0,063 | 5,477 | 9,759 | 8,400 | 70 | | 1540 | + | - | + |
| 70% (PuO ₂ – UO ₂) – 30% MgO | WONS - 10 | 5,063 | 0,051 | 7,545 | 11,821 | 9,520 | 66 | 7,962 | 1709 | - | + | - |
| | WONS - 11 | 4,765 | 0,048 | 7,101 | 11,126 | 8,960 | 68 | | 1619 | - | + | - |
| | WONS - 12 | 4,468 | 0,045 | 6,657 | 10,430 | 8,400 | 70 | | 1529 | + | - | + |
| 60% (PuO ₂ – UO ₂) – 40% MgO | WONS - 13 | 3,631 | 0,036 | 8,418 | 12,394 | 9,520 | 66 | 7,919 | 1701 | - | + | - |
| | WONS - 14 | 3,418 | 0,034 | 7,923 | 11,665 | 8,960 | 68 | | 1611 | - | + | - |
| | WONS - 15 | 3,204 | 0,032 | 7,427 | 10,936 | 8,400 | 70 | | 1522 | + | - | + |
| 50% (PuO ₂ – UO ₂) – 50% MgO | WONS - 16 | 2,594 | 0,026 | 9,019 | 12,842 | 9,520 | 66 | 7,887 | 1659 | - | + | - |
| | WONS - 17 | 2,441 | 0,024 | 8,488 | 12,086 | 8,960 | 68 | | 1605 | - | + | - |

Appendix B

Table B1 – The values obtained during the study and optimization of the operating modes of a plasma reactor based on a HFT-plasma torch

| | | | | | | Anode | | | | Grid | | | | Electrode | | | | Case | | | |
|----|------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| No | I, A | U _a , kWt | P ₀ , kWt | T _{bf} , °C | S, cm ² | m _a , kg/s | dT _a , °C | P _a , kWt | T _a , °C | m _g , kg/s | dT _g , °C | P _g , kWt | T _g , °C | M _e , kg/s | dT _e , °C | P _e , kWt | T _e , °C | M _c , kg/s | dT _c , °C | P _c , kWt | T _c , °C |
| 1 | 3 | 5,7 | 17,1 | 34 | 3x10 | 0,244 | 7,5 | 7,65 | 18,4 | 0,066 | 4,3 | 1,18 | 12,3 | 0,119 | 4,1 | 2,05 | 14,7 | 0,057 | 1 | 0,238 | 11,9 |
| 2 | 3 | 5,7 | 17,1 | 34,6 | 3x8 | 0,244 | 7,5 | 7,65 | 18,4 | 0,066 | 4,3 | 1,18 | 12,3 | 0,119 | 4,1 | 2,05 | 14,7 | 0,057 | 1 | 0,238 | 11,9 |
| 3 | 3 | 5,8 | 17,4 | 35,7 | 3x6 | 0,244 | 7,6 | 7,75 | 18,5 | 0,066 | 4,3 | 1,18 | 12,3 | 0,119 | 4,2 | 2,1 | 14,8 | 0,057 | 1 | 0,238 | 11,9 |
| 4 | 3 | 5,8 | 17,4 | 36,6 | 3x4 | 0,244 | 7,6 | 7,75 | 18,5 | 0,066 | 4,3 | 1,18 | 12,3 | 0,119 | 4,2 | 2,09 | 14,8 | 0,057 | 1 | 2,38 | 11,9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3,5 | 5,8 | 20,3 | 37,3 | 3x10 | 0,244 | 8,5 | 8,67 | 19,4 | 0,066 | 3,7 | 1,02 | 11,7 | 0,119 | 4,9 | 2,45 | 15,5 | 0,057 | 1 | 0,238 | 11,9 |
| 2 | 3,5 | 5,8 | 20,3 | 36,8 | 3x8 | 0,244 | 8,5 | 8,67 | 19,4 | 0,066 | 3,8 | 1,05 | 11,8 | 0,119 | 4,9 | 2,45 | 15,5 | 0,057 | 1 | 0,238 | 11,9 |
| 3 | 3,5 | 6,3 | 22,05 | 36,5 | 3x6 | 0,244 | 8,4 | 8,57 | 19,3 | 0,066 | 4 | 1,1 | 12 | 0,119 | 4,9 | 2,45 | 15,5 | 0,057 | 1 | 0,238 | 11,9 |
| 4 | 3,5 | 6,5 | 22,75 | 37 | 3x4 | 0,244 | 8,6 | 8,77 | 19,5 | 0,066 | 4,1 | 1,13 | 12,1 | 0,119 | 5,1 | 2,55 | 15,7 | 0,057 | 1 | 0,238 | 11,9 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 4 | 6,5 | 26 | 37,8 | 3x10 | 0,244 | 9,3 | 9,49 | 20,2 | 0,066 | 3,6 | 0,99 | 11,6 | 0,119 | 5,4 | 2,7 | 16 | 0,057 | 1 | 0,238 | 11,9 |

Continuation of the table B1

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----|------|------|-----|-------|-----|------|------|-------|-----|------|------|-------|-----|------|------|-------|-----|-------|------|
| 2 | 4 | 6,7 | 26,8 | 38 | 3x8 | 0,244 | 9,4 | 9,59 | 20,3 | 0,066 | 3,5 | 0,96 | 11,5 | 0,119 | 5,5 | 2,75 | 16,1 | 0,057 | 1 | 0,238 | 11,9 |
| 3 | 4 | 6,9 | 27,6 | 37,9 | 3x6 | 0,244 | 9,6 | 9,79 | 20,5 | 0,066 | 3,3 | 0,91 | 11,3 | 0,119 | 5,6 | 2,8 | 16,2 | 0,057 | 0,9 | 0,214 | 11,8 |
| 4 | 4 | 7 | 28 | 36,8 | 3x4 | 0,244 | 9,6 | 9,79 | 20,5 | 0,066 | 3 | 0,83 | 11 | 0,119 | 5,7 | 2,85 | 16,3 | 0,057 | 0,8 | 0,191 | 11,7 |

Table B2 – Determination of the temperature of the air plasma jet and the installation efficiency of the installation

| № | I, A | U _a , kWt | P ₀ , kWt | T _{bf} , °C | S, cm ² | HFT-plasma torch | | | | | |
|---|------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|----------------------|------|
| | | | | | | P _j , kWt | Q _f , kg/s | H _T , kJ/kg | T _j , °C | P _p , kWt | η, % |
| 1 | 3 | 5,7 | 17,1 | 34 | 3x10 | 5,737 | 0,11 | 354 | 350 | 5,98 | 96 |
| 2 | 3 | 5,7 | 17,1 | 34,6 | 3x8 | 5,737 | 0,12 | 349 | 350 | 5,98 | 96 |
| 3 | 3 | 5,8 | 17,4 | 35,7 | 3x6 | 5,885 | 0,13 | 344 | 350 | 6,12 | 96,1 |
| 4 | 3 | 5,8 | 17,4 | 36,6 | 3x4 | 5,884 | 0,15 | 338 | 340 | 6,12 | 96,1 |
| 1 | 3,5 | 5,8 | 20,3 | 37,3 | 3x10 | 7,682 | 0,11 | 372 | 375 | 7,92 | 97 |
| 2 | 3,5 | 5,8 | 20,3 | 36,8 | 3x8 | 7,654 | 0,12 | 365 | 375 | 7,89 | 97 |
| 3 | 3,5 | 6,3 | 22,05 | 36,5 | 3x6 | 9,451 | 0,13 | 370 | 375 | 9,69 | 97,5 |
| 4 | 3,5 | 6,5 | 22,75 | 37 | 3x4 | 9,82 | 0,15 | 365 | 375 | 10,1 | 97,6 |
| 1 | 4 | 6,5 | 26 | 37,8 | 3x10 | 12,34 | 0,11 | 415 | 425 | 12,6 | 98,1 |
| 2 | 4 | 6,7 | 26,8 | 38 | 3x8 | 13,02 | 0,12 | 411 | 425 | 13,3 | 98,2 |
| 3 | 4 | 6,9 | 27,6 | 37,9 | 3x6 | 13,67 | 0,13 | 402 | 420 | 13,9 | 98,5 |
| 4 | 4 | 7 | 28 | 36,8 | 3x4 | 14,15 | 0,15 | 393 | 400 | 14,3 | 98,7 |

Appendix C

Table C1– Composition of the WONS and physical-mechanical properties of the "neodymium oxide–samarium oxide–magnesium oxide", simulating the plasmachemical synthesis of dispersion REMIX-fuel ($f_d = 35$ Hz, $Q_{RTW} = 2.8$ kg/s)

| The composition of WONS | | | | | The composition of OC | | | Physical and chemical properties of OC | | |
|-------------------------|--|--|--|------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------|-------------------------------------|
| The composition of WNS | | | | C ₃ H ₆ O, % | | | | | | |
| N _o | Nd(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O, g/l | Sm(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O, g/l | Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O, g/l | | | Nd ₂ O ₃ , % | Sm ₂ O ₃ , % | MgO, % | D ₅₀ , microne | S _{yd} , m ² /g |
| 1 | 260,8 | 63,8 | - | 64,4 | 80,0 | 20,0 | - | 12,9 | 10,2 | 79 |
| 2 | 247,7 | 60,6 | 80,1 | 63,4 | 76,0 | 19,0 | 5,0 | 12,0 | 10,8 | 76 |
| 3 | 234,7 | 57,4 | 160,2 | 62,3 | 72,0 | 18,0 | 10,0 | 8,2 | 11,1 | 72 |
| 4 | 208,6 | 51,0 | 320,4 | 60,3 | 64,0 | 16,0 | 20,0 | 6,2 | 13,0 | 64 |
| 5 | 182,5 | 44,6 | 480,6 | 58,4 | 56,0 | 14,0 | 30,0 | 5,7 | 16,1 | 61 |
| 6 | 130,4 | 31,9 | 801,0 | 55,0 | 40,0 | 10,0 | 50,0 | 5,3 | 18,6 | 59 |