

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

---

Институт – Физико-технический  
Направление – Ядерные физика и технологии  
Кафедра – Электроника и автоматика физических установок  
Специальность – Электроника и автоматика физических установок

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ**

Тема работы
<b>МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО УРАН – ПЛУТОНИЕВОГО (СНУП) ТОПЛИВА</b>

УДК 004.94:621.039.54

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0712	Брыляков Н.С.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ливенцов С.Н.	д-р техн. наук, профессор		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Е.В.	канд. филос. наук, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Акимов Д.В.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭАФУ	Горюнов А.Г.	д-р техн. наук, доцент		

Томск – 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	Представлять современную картину мира на основе целостной системы естественнонаучных и математических знаний, а также культурных ценностей; понимать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности, защите интересов личности, общества и государства; быть готовым к анализу социально-значимых процессов и явлений, применять основные положения и методы гуманитарных, социальных и экономических наук при организации работы в организации, к осуществлению воспитательной и образовательной деятельности в сфере публичной и частной жизни.
P2	Обладать способностями: действовать в соответствии с Конституцией РФ, исполнять свой гражданский и профессиональный долг, руководствуясь принципами законности и патриотизма, правилами и положениями, установленные законами и другими нормативными правовыми актами; к логическому мышлению, обобщению, анализу, прогнозированию, постановке исследовательских задач и выбору путей их достижения; понимать основы национальной и военной безопасности РФ; работать в многонациональном коллективе; формировать цели команды, применять методы конструктивного разрешения конфликтных ситуаций; использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ.

Р3	Самостоятельно, методически правильно применять методы самостоятельного физического воспитания для повышения адаптационных резервов организма и укрепления здоровья, готовностью к достижению и поддержанию должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Р4	Свободно владеть литературной и деловой письменной и устной речью на русском языке, навыками публичной и научной речи. Уметь создавать и редактировать тексты профессионального назначения, владеть одним из иностранных языков как средством делового общения.
Р5	Находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; быть готовым к принятию ответственности за свои решения в рамках профессиональной компетенции, принимать решения в нестандартных условиях обстановки и организовывать его выполнение, самостоятельно действовать в пределах предоставленных прав; самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений, в том числе в новых областях, непосредственно не связанных со сферой деятельности, развития социальных и профессиональных компетенций.
Р6	Применять основные законы естественнонаучных дисциплин, математический аппарат, вычислительную технику, современные методы исследований процессов и объектов для формализации, анализа и выработки решения профессиональных задач.
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
Р7	Уметь самостоятельно повышать уровень знаний в области

	<p>профессиональной деятельности, приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт, методы научно-исследовательской и практической деятельности, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; работать с информацией в глобальных компьютерных сетях; оценивать перспективы развития АСУ и АСНИ физических установок (вооружения и техники, процессов и аппаратов атомной промышленности и энергетики), использовать современные достижения в научно-исследовательских работах.</p>
P8	<p>Применять знания о процессах в ядерных энергетических и физических установках, и о технологических процессах ядерного топливного цикла используя методы математического моделирования отдельных стадий и всего процесса для разработки АСУ ТП и АСНИ с применением пакетов автоматизированного проектирования и исследований.</p>
P9	<p>Использовать знания о протекающих процессах в ядерных энергетических установках, аппаратах производств ядерного топливного цикла, теории и практики АСУ ТП, при проектировании, настройке, наладке, испытаниях и эксплуатации современного оборудования, информационного, организационного, математического и программного обеспечения, специальных технических средств, сооружений, объектов и их систем; организовать эксплуатацию физических установок (вооружения и техники, процессов и аппаратов атомной промышленности и энергетики), современного оборудования и приборов с учетом требований руководящих и</p>

	<p>нормативных документов; быть готовым к освоению новых образцов физических установок, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний.</p>
P10	<p>Использовать технические средства и информационные технологии, проводить предварительное технико-экономического обоснования проектных расчетов устройств и узлов приборов и установок, расчет, концептуальную и проектную проработку программно-технических средств АСУ ТП и АСНИ, применять методы оптимизации, анализа вариантов, поиска решения многокритериальных задач с учетом неопределенностей объекта управления, разрабатывать способы применения программно-технических средств АСУ ТП и АСНИ, решать инженерно-физические и экономические задачи, применяя знания теории и практики АСУ, включающее математическое, информационное и техническое обеспечения, для проектирования, испытания, внедрения и эксплуатации АСУ ТП и АСНИ.</p>
P11	<p>Понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, соблюдать основные требования безопасности и защиты государственной тайны; выполнять мероприятия по восстановлению работоспособности физических установок (вооружения и техники, процессов и аппаратов атомной промышленности и энергетики) при возникновении аварийных ситуаций, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения; проводить анализ и оценку обстановки для принятия решения в случае возникновения аварийных ситуаций, экологическую безопасность, нормы и правило производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности.</p>

P12	<p>Разрабатывать проекты нормативных и методических материалов, технических условий, стандартов и технических описаний средств АСУ ТП и АСНИ, регламентирующих работу в сфере профессиональной деятельности; осуществлять разработку технического задания, расчет, проектную проработку современных устройств и узлов приборов, установок (образцов вооружения, программно-технических средств АСУ ТП и АСНИ), использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов.</p>
P13	<p>Использовать в профессиональной деятельности нормативные правовые акты в области защиты государственной тайны, интеллектуальной собственности, авторского права и в других областях; осуществлять поиск, изучение, обобщение и систематизацию научно-технической информации, нормативных и методических материалов в сфере своей профессиональной деятельности.</p>
P14	<p>Проявлять и активно применять способность к организации и управлению работой коллектива, в том числе: находить и принять управленческие решения в сфере профессиональной деятельности; разрабатывать планы работы коллективов; контролировать соблюдение технологической дисциплины, обслуживания, технического оснащения, размещения технологического оборудования; организовывать учет и сохранность физических установок (вооружения и техники), соблюдение требований безопасности при эксплуатации; использовать основные методы защиты персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий.</p>

P15	<p>Демонстрировать способность к осуществлению и анализу научно-исследовательских, технологических и пуско-наладочных работ, разработке планов и программ их проведения, включая ядерно-физические эксперименты, выбору методов и средств решения новых задач с применением современных электронных устройств, представлению результатов исследований и формулированию практических рекомендаций их использования в формах научно-технических отчетов, обзоров, публикаций по результатам выполненных работ; выполнять полный объем работ, связанных с техническим обслуживанием физических установок с учетом требований руководящих и нормативных документов.</p>
-----	---

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

Институт – Физико-технический  
 Направление – Ядерные физика и технологии  
 Кафедра – Электроника и автоматика физических установок  
 Специальность – Электроника и автоматика физических установок

**УТВЕРЖДАЮ**  
 Зав. кафедрой ЭАФУ ФТИ  
 \_\_\_\_\_ А.Г. Горюнов  
 «03» октября 2016 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

**В форме:**

Дипломного проекта
--------------------

**Студенту:**

Группа	ФИО
0712	Брылякову Н.С.

**Тема работы:**

Тема ВКР в соответствии с приказом	
<b>Утверждена приказом директора ФТИ</b>	от 31.10.2016 № 9286/с
<b>Дата сдачи студентом выполненной работы</b>	23 января 2017 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объект исследования – установка карботермического синтеза смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Аналитический обзор существующей модели процесса карботермического синтеза, обзор установки карботермического синтеза, разработка математической модели установки синтеза в среде Matlab/Simulink, проверка модели на адекватность, перенос модели в программный комплекс КОД ТП.

<b>Перечень графического материала</b>	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент, канд. филос. наук Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	ассистент Акимов Д.В..

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	03 октября 2016 г.
---	--------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ливенцов С.Н.	д-р техн. наук, профессор		03.10.16

**Задание принял к исполнению студент**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0712	Брыляков Н.С.		03.10.16

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 131 с., 29 рис., 16 табл., 21 источник, 4 приложения.

МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КАРБОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ, СНУП ТОПЛИВО, НАГРЕВ, ВРЕМЯ ВЫДЕРЖКИ, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ, РЕГУЛИРОВАНИЕ

Объектом исследования является установка (печь) карботермического синтеза (КТС) смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива

Цель работы – изучение и анализ участка карботермического синтеза, а также существующей модели процесса, с последующим составлением математического описания процесса, для его применения программном комплексе КОД ТП

В процессе работы проводился аналитический обзор процессов, протекающих при проведении карботермического синтеза нитридов из исходной смеси диоксидов урана и плутония.

В результате исследования разработано математическое описание установки и процесса карботермического синтеза, адекватность описания проверена на экспериментальных данных, также предложена система автоматического управления процессом синтеза.

Область применения: синтез систем автоматического управления технологическим процессом карботермического синтеза, определение оптимальных режимов проведения процесса, тренажер персонала с возможностью моделирования нештатных ситуаций.

Экономическая значимость работы заключается в возможности проведения исследования влияния различных параметров установки на результат процесса без проведения экспериментов на реальном аппарате.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В данной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.003–83. Система стандартов по безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.

СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.

СНиП 41.01–2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование.

СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

В данной работе применены следующие сокращения:

карботермический синтез; КТС.

смешанный нитрид урана и плутония; СНУП.

полный факторный эксперимент; ПФЭ.

быстрые нейтроны; БН.

трубчатый электронагреватель; ТЭН.

тепловыделяющий элемент; ТВЭЛ.

тепловыделяющая сборка; ТВС.

ядерный топливный цикл; ЯТЦ.

система автоматического управления; САУ.

трудовой кодекс; ТК.

замкнутый ядерный топливный цикл; ЗЯТЦ.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	16
1 Аналитический обзор.....	18
1.1 Актуальность работы.....	18
1.2 Модуль фабрикации.....	20
1.3 Процесс карботермического синтеза .....	21
1.4 Технология карботермического синтеза.....	23
1.5 Требования к математической модели .....	24
1.6 Анализ существующей модели карботермического синтеза .....	24
2 Разработка математической модели.....	27
2.1 Анализ установки и процессов карботермического синтеза.....	27
2.2 Описание математической модели.....	29
2.2.1 Описание динамики химического превращения исходных оксидов урана и плутония в нитриды .....	29
2.2.2 Математическое описание изменения состава прессовок .....	35
2.2.3 Математическое описание динамики изменения состава газовой атмосферы .....	37
2.2.4 Математическое описание зависимости температуры и давления в реакционной зоне печи от различных факторов.....	40
3 Моделирование.....	43
3.1 Разработка алгоритма численного моделирования в пакете Matlab/Simulink.....	43
3.2 Результаты моделирования .....	45
3.3 Проверка адекватности математической модели .....	52
4 Реализация математической модели в среде КОД ТП .....	54

4.1	Адаптация модели под среду моделирования КОД ТП.....	54
4.2	Описание исполняемых файлов модели в среде КОД ТП.....	56
4.3	Описание интерфейса модели.....	57
4.4	Результаты моделирования.....	59
5	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	62
5.1	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	62
5.2	SWOT-анализ.....	63
5.3	Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	65
5.4	Инициация проекта.....	68
5.5	План проекта.....	71
5.6	Бюджет научного исследования.....	73
5.6.1	Основная заработная плата.....	73
5.6.2	Расчет потребляемой электроэнергии.....	75
5.6.3	Затраты на специальное оборудование.....	76
5.7	Группировка затрат по статьям.....	77
5.8	Оценка сравнительной эффективности исследования.....	79
6	Социальная ответственность.....	82
6.1	Введение.....	82
6.2	Характеристика вредных и опасных факторов, имеющих место в лаборатории.....	84
6.3	Электробезопасность.....	84
6.4	Мероприятия по защите от электромагнитного излучения.....	86
6.5	Мероприятия по борьбе с производственным шумом.....	88

6.6	Мероприятия по пожарной безопасности .....	89
6.7	Мероприятия по выполнению норм естественного и искусственного освещения.....	90
6.8	Мероприятия по выполнению норм вентиляции и отопления.....	92
6.9	Требования безопасности при работе с ЭВМ .....	93
6.10	Выводы по разделу .....	95
	Заключение .....	96
	Список публикаций студента .....	98
	Список использованных источников.....	99
	Приложение А. Текст блока S-Function level 2 «pechKTC.m» .....	101
	Приложение Б. Текст файла «TFurnace.cpp» .....	110
	Приложение В. Текст файла «TFurnace.h» .....	118
	Приложение Г. Презентация.....на отдельных листах	
	Титульный лист	
	Актуальность работы	
	Схемы топливного цикла	
	Цели и задачи	
	Модуль фабрикации	
	Объект исследования	
	Требования к математической модели	
	Исследование существующей модели	
	Методы и методики для решения поставленных задач	
	Результаты аппроксимации	
	Уравнения расчета убыли масс диоксидов урана и плутония	
	Уравнения расчета массы углерода и полученных нитридов	
	Уравнения расчета массового состава газовой атмосферы	
	Уравнения расчета температуры и давления в реакционной зоне печи	
	Алгоритм расчета по математической модели	
	Моделирование процесса КТС	

Результаты моделирования установки КТС

Проверка адекватности модели

Включение модели в комплекс КОД ТП

Модель с САУ в комплексе КОД ТП

Отображение информации о составе прессовок и газовой атмосферы

Результаты моделирования в комплексе КОД ТП

Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Результаты работы

Диск CD-R..... в конверте на обороте обложки

643.ФЮРА.00008-01 81 01 Пояснительная записка ВКР. Файл

Брыляков\_ВКР.doc

Презентация к ВКР. Файл Брыляков\_ВКР\_презентация.pptx

Модель в Matlab/Simulink. Файл model.mdl

Текст блока S-Function level 2. Файл pechKTC.m

Текст исходного кода модели в пакете КОД ТП. Файл TFurnace.cpp

Текст заголовочного файла модели в пакете КОД ТП. Файл TFurnace.h

## ВВЕДЕНИЕ

Проект Прорыв – один из главных современных мировых проектов в ядерной энергетике, реализуемый в России ведущими отраслевыми учеными и специалистами, в рамках которого предусматривается создание ядерных энергетических технологий нового поколения на базе замкнутого ядерного топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах.

На площадке Сибирского химического комбината строится опытно-демонстрационный энергетический комплекс в составе энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем и замыкающего ядерный топливный цикл пристанционного завода, который включает в себя модуль переработки облученного смешанного уран-плутониевого (нитридного) топлива, а также модуль фабрикации и рефабрикации для изготовления стартовых ТВЭЛов из привозных материалов, а впоследствии ТВЭЛов из переработанного облученного ядерного топлива [1].

Одним из этапов технологии фабрикации нитридного топлива является процесс карботермического синтеза.

Процесс карботермического синтеза заключается в выдержке диоксидов смеси урана и плутония при температуре 1550–1650 °С сначала в постоянном потоке азота, а затем в потоке смеси азота и водорода.

В результате химических реакций, протекающих в процессе синтеза, из исходных порошков диоксидов урана и плутония получается смесь нитридов этих элементов.

Для проектирования эффективной технологической установки процесса КТС, синтеза робастной системы управления установкой, поиска оптимальных режимов работы необходимо детальное понимание всех стадий процесса и знание количественных зависимостей между технологическими переменными.

					<i>643.ФЮРА.00008-01 81 01</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Брыляков</i>			<i>Введение</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ливенцов</i>						
<i>Консульт</i>								
<i>Н. Кантр.</i>		<i>Ефремов</i>						
<i>Утверд.</i>		<i>Горюнов</i>						
						<i>ТПУ</i>	<i>ФТИ</i>	
						<i>Группа</i>	<i>0712</i>	

Для этого необходимо провести тщательный анализ технологического процесса как объекта химической технологии и объекта управления, а также разработать математическую модель процесса КТС адекватность которой была бы достаточной для решения задач проектирования, синтеза САУ и оптимизации режимов.

Следовательно, целью данной работы является повышение эффективности проектирования, синтеза алгоритмов управления и поиска оптимальных режимов технологической установки КТС. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ технологического процесса как объекта химической технологии;
- анализ технологического процесса как объекта управления;
- разработка математической модели процесса КТС;
- верификация математической модели процесса КТС;
- реализация математической модели в комплексе КОД ТП.

# 1 Аналитический обзор

## 1.1 Актуальность работы

Современная ядерная индустрия в энергетическом направлении базируется на уран-плутониевом цикле, в котором уран играет доминирующую роль. Но урановый цикл обладает рядом очевидных недостатков:

- большое количество отработанного топлива;
- большое количество радиоактивных отходов топливного цикла;
- большие и дорогостоящие работы по обогащению урана и разделению урана и плутония;
- малая доля использования топлива;
- технологическая разомкнутость звеньев топливного цикла.

В таких условиях для работы наиболее распространенного теплового реактора ВВЭР мощностью 1 ГВт требуется добывать 160 тонн природного урана. После обогащения 139 тонн обедненного урана отправляется на склад, а 21 тонна пускается на производство топлива.

Недостатки атомной энергетики возможно преодолеть при использовании реакторов на быстрых нейтронах. В таком случае происходит замыкание топливного цикла, а подпитка осуществляется со склада отвалного урана, что позволяет постепенно снижать запасы обедненного урана и минимизировать количество радиоактивных отходов [2].

Работы, проводимые в рамках проекта «Прорыв», подразумевают создание на площадке Сибирского химического комбината реактора на быстрых нейтронах и пристанционного ЗЯТЦ.

					<i>643.ФЮРА.00008-01 81 01</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Брыляков</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ливенцов</i>					<i>Листов</i>
<i>Консульт</i>					<i>Аналитический обзор</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Ефремов</i>				<i>ТПУ</i>	<i>ФТИ</i>
<i>Утверд.</i>		<i>Горянов</i>				<i>Группа</i>	<i>0712</i>

Использование в данных реакторах мононитридного смешанного уран-плутониевого топлива позволяет повысить его воспроизводство за счет повышенной плотности нитридного топлива ( $14,3 \text{ г/см}^3$ ) по сравнению с диоксидом ( $10,9 \text{ г/см}^3$ ) и карбидом ( $13,6 \text{ г/см}^3$ ). Также нитридное топливо обладает теплопроводностью в 6 раз превышающей теплопроводность оксидного топлива, и имеет приемлемую температуру плавления.

Внедрение новой технологии производства топлива предполагает анализ технологических процессов и выбор оптимальных режимов их проведения, проектирование и создание аппаратов, а также синтез алгоритмов управления. Для минимизации материальных, энергетических и временных ресурсов, используемых при решении данного комплекса задач, требуется инструмент, позволяющий исследовать и совершенствовать технологию.

Таким инструментом является программный комплекс КОД ТП, разрабатываемый в рамках договора с АО ВНИИНМ сотрудниками кафедры Электроники и автоматики физических установок Физико-технического института. Данный комплекс является частью проекта «Коды нового поколения». Расширение функционала комплекса посредством включения в его состав математического описания новых аппаратов позволит увеличить область применения данного инструмента и использовать его при проектировании и отработке новых технологических процессов. Экспериментальные исследования при использовании данного комплекса требуются только для верификации моделей, за счет этого достигается минимальная затрата ресурсов.

Результат решения задач, поставленных в данной работе, дополнит комплекс КОД ТП математическим описанием аппарата КТС, что позволит применить данный инструмент для повышения эффективности проектирования, синтеза алгоритмов управления, а также для поиска оптимальных режимов технологической установки КТС.

## 1.5 Требования к математической модели

Разрабатываемая модель должна описывать динамику химического превращения диоксидов урана и плутония в нитриды, состав газовой атмосферы, температуру и давление в реакционной зоне печи КТС. Также модель должна учитывать влияние температуры в реакционной зоне печи и расхода газов через печь на динамику химической реакции и влияние конструкции аппарата на расчет температуры и давления в реторте печи. Данные требования обусловлены тем, что эти параметры определены технологией проведения синтеза и являются определяющими по отношению к конечным свойствам топлива.

Помимо вышеописанных требований в модели должна существовать возможность изменения конструктивных параметров печи, таких как объем реакционной зоны, площадь внутренней поверхности, материал печи и масса ее внутренней камеры, для возможности адекватного моделирования процесса в случае конструктивных изменений установки карботермического синтеза. Так как процесс синтеза достаточно продолжительный, то должна существовать возможность реализации на основе полученного математического описания режимов ускоренного времени и реального для ее реализации в качестве тренажера.

## 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

В связи с постоянным движением и развитием рынка, возникает необходимость детального анализа конкурирующих разработок. Подобный анализ позволяет скорректировать развитие исследования и оценить конкурирующие разработки, а именно их слабые и сильные стороны.

Единственное и конкурентное решение для моделирования процесса, подлежащее рассмотрению, это проведение экспериментальных исследований на реальной промышленной установке.

Оценочная карта, представленная в таблице 1, позволит наиболее подробно сравнить конкурентные технические решения.

По приведенной таблице можно с сделать вывод о высокой конкурентоспособности разрабатываемой модели, это подтверждается отношением итоговых баллов  $K_f$  и  $K_{k1}$ , равным 1,54, что превышает значение 1.

Достоверность данных, время проведения экспериментального исследования и ресурсосбережение являются наиболее значимыми критериями. Разрабатываемая математическая модель позволяет экономить время (около 30 минут моделирования вместо 50 часов реального экспериментального исследования), а также материалы, необходимые для проведения эксперимента. Также, можно заметить, что предполагаемая разработка не уступает реальной установке по абсолютному большинству приведенных критериев.

					<i>643.ФЮРА.00008-01 81 01</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Брыляков</i>			<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ливенцов</i>						
<i>Консульт</i>		<i>Меньшикова</i>						
<i>Н. Контр.</i>		<i>Ефремов</i>						
<i>Утверд.</i>		<i>Горюнов</i>						
						<i>ТПУ</i>	<i>ФТИ</i>	
						<i>Группа</i>	<i>0712</i>	

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бф	Бк1	Кф	Кк1
1 Достоверность полученных данных	25 %	3	5	0,75	1,25
2 Длительность проведения эксперимента	25 %	5	2	1,25	0,5
3 Ресурсоэффективность	15 %	5	1	0,75	0,15
4 Безопасность	10 %	5	3	0,5	0,3
5 Гибкость системы	10 %	4	2	0,4	0,2
6 Простота использования	5 %	4	2	0,2	0,1
7 Уровень влияния помех	2,5 %	4	2	0,1	0,05
8 Предполагаемый срок эксплуатации	2,5 %	3	3	0,075	0,075
9 Проведение эксперимента в предельных режимах работы	2,5 %	4	2	0,1	0,05
10 Обслуживание при эксплуатации	2,5 %	5	3	0,125	0,075
Итого	100 %	42	25	4,25	2,75

## 5.2 SWOT-анализ

Объективная оценка конкурентоспособности и возможных перспектив развития проекта предполагает подробный анализ сильных и слабых сторон разработки, а также угроз и возможностей, влияющих на нее. Наиболее точное направление работ по проекту позволяет сформировать SWOT-анализ.

Составление матрицы SWOT-анализа включает оценку сильных и слабых сторон проекта, а также угрозы и возможности проекта и их корреляцию.

В качестве сильных сторон проекта можно выделить замещение реального эксперимента численным моделированием, высокая скорость расчета, гибкость системы, экономия ресурсов на проведении экспериментов.

Наиболее слабой стороной проекта является ограниченная точность полученных в результате моделирования данных.

Основной возможностью разработки является применение разрабатываемой модели в других средах моделирования.

Разработка адекватной модели процесса синтеза, которая может быть применена в других средах при минимальном изменении, является основной стратегией развития данного проекта.

Угрозой данному проекту является изменение технологии процесса синтеза топлива или разработка принципиально новой технологии, в которой применяются другие физико-химические принципы, что приведет к неактуальности разрабатываемой математической модели.

В итоговой матрице SWOT-анализа (таблица 2) приведена корреляция между сильными и слабыми сторонами проекта с возможностями и угрозами проекта.

Таблица 2 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>C1 Замещение эксперимента численным моделированием.</p> <p>C2 Быстрота расчета.</p> <p>C3 Гибкость системы.</p> <p>C4 Экономия ресурсов.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1 Неточность получаемых данных</p> <p>Сл2 Высокие системные требования</p>
<p>Возможности проекта:</p> <p>B1 Применение модели в различных системах моделирования процессов</p>	<p>Гибкость системы позволяет использование ее при минимальном изменении в аналогичных системах моделирования</p>	<p>Уточнение и ускорение расчетных данных при помощи более продвинутой системы моделирования</p>
<p>Угрозы проекта:</p> <p>У1 Изменение технологии.</p>	<p>Адаптация модели под измененную технологию</p>	<p>Разработка более точной модели для измененной технологии</p>

### 5.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценка степени готовности проекта к коммерциализации полезна на любой стадии его жизненного цикла. Для проведения оценки необходимо определить степень проработанности научного проекта, а также уровень имеющихся знаний у разработчика (таблица 3).

Таблица 3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
Определен имеющийся научно-технический задел	5	4
Определены перспективные направления коммерциализации задела	4	4
Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
Определена товарная форма задела для представления на рынок	2	2
Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	4
Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	1

Продолжение таблицы 3

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	3
Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	3
Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
Проработаны вопросы финансирования научной разработки	1	1

Продолжение таблицы 3

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	39	38

Оценка показала среднюю степень готовности проекта к коммерциализации. Также анализ показал необходимость привлечения в проект специалистов по вопросам маркетинговых исследований, финансирования коммерциализации.

В качестве метода коммерциализации выбран франчайзинг, так как разрабатываемый программный комплекс будет использоваться заказчиком при оказании услуг третьим лицам по факту выполнения заказчиком программного комплекса условий, указанных в договоре.

#### 5.4 Инициация проекта

Инициация проекта состоит из процессов, которые выполняются для нового проекта или новой стадии проекта. Для этого определяются начальные цели, содержание, фиксируются ресурсы. Также определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта.

Заинтересованные стороны проекта отображены в таблице 4.

Таблица 4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Госкорпорация «Росатом» в рамках проекта «Прорыв»	Получение математической модели участка карботермического синтеза смешанного нитридного уран-плутониевого топлива для автоматизации данной промышленной установки
ТПУ, кафедра ЭАФУ	Внедрение математической модели в виде программного кода в проект «КОД ТП» в качестве отдельного аппарата

В таблице 5 представлена информация о целях проекта, критериях достижения целей, а также требования к результатам проекта.

Таблица 5 – Цели и результаты проекта

Цели проекта	Моделирование участка карботермического синтеза смешанного нитридного уран-плутониевого топлива;
Ожидаемые результаты проекта	Оптимизация режима работы установки синтеза; Синтез системы автоматического управления для установки в процессе моделирования;
Критерии приемки результата проекта	Адекватность математической модели процесса разделения
Требования к результату проекта	Компьютерная математическая модель процесса синтеза, удовлетворяющая требованиям скорости, точности расчета, гибкости системы

Рабочая группа проекта отображена в таблице 6.

Таблица 6 – Рабочая группа проекта

ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, ч.
Ливенцов С.Н., ТПУ, кафедра ЭАФУ, профессор	Научный руководитель	Консультирование, определение задач, контроль выполнения.	105
Брыляков Н.С., ТПУ, кафедра ЭАФУ, техник	Инженер (дипломник)	Анализ литературных источников, моделирование, программирование	614

Ограничения проекта приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Ограничения проекта

<b>Фактор</b>	<b>Ограничения</b>
Бюджет проекта	95000 р.
Источники финансирования	Средства по х/д №0-116/14
Сроки проекта	15.01.2016-16.01.2017
Дата завершения проекта	25.12.2016

## 5.5 План проекта

В рамках планирования научного проекта составляется календарный график проекта, который может быть представлен в виде линейного графика.

Линейный график представлен в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление технического задания	4	9.08.16	13.08.16	Ливенцов С.Н.
2	Изучение литературы	44	14.08.16	28.09.16	Брыляков Н.С.
3	Анализ процессов	10	29.09.16	8.10.16	Брыляков Н.С.
4	Математическое описание	22	9.10.16	1.11.16	Брыляков Н.С.
5	Разработка программы	4	2.11.16	6.11.16	Брыляков Н.С.
6	Тестирование модели	3	7.11.16	10.11.16	Брыляков Н.С. Ливенцов С.Н.
7	Оценка адекватности модели	1	11.11.16	11.11.16	Брыляков Н.С.
8	Внедрение SimSAR	9	12.11.16	21.11.16	Брыляков Н.С. Ливенцов С.Н.

Таблица 9 – Календарный план-график проведения работ

Код работы	Вид работы	Исполнитель	Т <sub>к,дн</sub>	август			сентябрь			октябрь			ноябрь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
				1	Составление технического задания	Руководитель	4	■							
2	Изучение литературы	Дипломник	44		▨	▨	▨								
3	Анализ процессов	Дипломник	10					▨							
4	Математическое описание	Дипломник	22						▨	▨	▨				
5	Разработка программы	Дипломник	4									▨			
6	Тестирование модели	Руководитель, дипломник	3									▨	■		
7	Оценка адекватности модели	Дипломник	1										▨		
8	Внедрение в программный комплекс КОД ТП	Руководитель, дипломник	9										▨	■	

▨ – дипломник    ■ – руководитель

## 5.6 Бюджет научного исследования

### 5.6.1 Основная заработная плата

Планирование бюджета исследования должно обеспечивать полное и достоверное отражение всех видов расходов, необходимых для реализации проекта.

В данной научной разработке планируемыми расходами являются основная заработная плата, дополнительная заработная плата, отчисления на социальные нужды, накладные расходы, а также расходы на электроэнергию при работе с компьютером.

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников. Величина расходов определяется из трудоемкости выполняемых работ. Расчет основной заработной платы представлен в таблице 10.

Основная заработная плата работника рассчитывается по следующей формуле (5.1):

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (5.1)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата,

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника,

$T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых работником.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле (5.2):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (5.2)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – оклад работника,

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в год,

$F_{\text{д}}$  – годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала.

Оклад руководителя составляет 36800 р.

Оклад дипломника составляет 7483 р.

Среднедневная заработная плата руководителя (формула (5.3)):

$$Z_{\text{д}}^{\text{рук}} = \frac{36800 \cdot 10,4}{299} = 1280 \text{ р.} \quad (5.3)$$

Среднедневная заработная плата дипломника (формула (5.4)):

$$Z_{\text{д}}^{\text{дип}} = \frac{7483 \cdot 10,4}{299} = 260 \text{ р.} \quad (5.4)$$

Таблица 10 – Расчет основной заработной платы

Этап	Исполнитель	Трудоемкость, чел.-дн.	З/п на один чел.-дн., р.	Всего з/п, р.
Составление ТЗ	Руководитель	4	1280	5120
Изучение литературы	Дипломник	44	260	11452
Анализ процессов	Дипломник	10	260	2602
Мат. описание	Дипломник	22	260	5726
Разработка программы	Дипломник	4	260	1041
Тестирование модели	Дипломник	3	260	780
Тестирование модели	Руководитель	3	1280	3840
Проверка адекватности	Дипломник	1	260	260
Внедрение	Дипломник	9	260	2342
Внедрение	Руководитель	9	1280	11520
Итого				44685

### 5.6.2 Расчет потребляемой электроэнергии

Основным потребляемым сырьем в данной научной разработке является потребление электроэнергии компьютером. Для расчета стоимости потребляемой электроэнергии необходимо знать потребляемую мощность компьютером, время работы и текущий тариф на электроэнергию. Расчет производится по формуле (5.5):

$$C_{\text{ээ}} = 6,6 \cdot Д \cdot Т \cdot М, \quad (5.5)$$

где 6,6 – средняя продолжительность рабочего дня;

Д – продолжительность работ;

Т – тариф на электроэнергию;

М – мощность, потребляемая ноутбуком.

По техническим характеристикам, ноутбук потребляет 60 Вт электроэнергии. Стоимость одного киловатт-часа электроэнергии составляет 5,8 рублей. Значит, за 6,6-часовой рабочий день затраты на работу ноутбука составят:  $6,6 \cdot 1 \cdot 5,8 / 1000 \cdot 60 = 2,29$  р.

### **5.6.3 Затраты на специальное оборудование**

В статью «затраты на специальное оборудование для научных работ» включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. В эту статью следует отнести персональный компьютер, который использовался непосредственно как средство разработки. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в виде амортизационных отчислений.

Для расчета амортизационных отчислений был выбран срок полезного использования  $n$  равный 5 лет.

Тогда норма амортизации  $a$  равна (формула (5.6)):

$$a = \frac{100}{n} = \frac{100}{5} = 20 \% . \quad (5.6)$$

Зная норму амортизации можно найти годовую сумму амортизации для машин и оборудования  $A$  (формула (5.7)):

$$A = \frac{15000 \cdot 20}{100} = 3000 \text{ р.} \quad (5.7)$$

Поэтому общая стоимость оборудования будет определяться только амортизацией за период работы над проектом, так как ноутбук не покупался для выполнения проекта. Расчеты по данной статье приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Затраты на специальное оборудование для научных работ

Наименование оборудования	Кол-во ед. оборудования	Цена ед. оборудования, р.	Общая стоимость оборудования за время выполнения проекта, р.
Ноутбук Packard Bell DOT S	1	15000	1000

### 5.7 Группировка затрат по статьям

Группировка затрат по статьям отображена в таблице 12.

Весь бюджет исследования составил 91407 р.

Таблица 12 – Группировка затрат по статьям

Вид работ	Основная з/п с учетом р/к, р.	Доп. з/п с учетом р/к, р.	Отчисления на соц. нужды, р	Затраты на спецоборудование, р.	Прочие прямые расходы, р	Накладные расходы, р	Итого себестоимость, р
1	6656	798	2236	1000	9	638	10339
2	14887	1786	5002		100	1429	23206
3	3383	406	1136		22	324	5274
4	7443	893	2501		50	714	11603
5	1353	162	454		9	129	2109
6	6007	720	2018		13	576	9336
7	228	40	113		3	32	527
8	18021	2162	6005		41	1730	28010
Итого							91407

## 5.8 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности  $I_{\Phi}^P$  и ресурсоэффективности  $I_m^P$ .

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают  $I_{\Phi}^P$  в ходе оценки бюджета затрат для вариантов исполнения научного исследования. Для разрабатываемой математической модели затратами на разработку модели, или 91407 р. В качестве аналога выступает промышленная установка синтеза нитридного топлива, её рыночная цена составляет 400 млн. р. Из этого следует, что затраты на установку будут являться наибольшим интегральным показателем реализации технической задачи  $\Phi_{max}$ .

Интегральный финансовый показатель разработки  $I_{\Phi}^P$  определяется (формула(5.8)):

$$I_{\Phi}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{91407}{400000000} = 0,0003. \quad (5.8)$$

Интегральный финансовый показатель аналога  $I_{\Phi}^A$  (формула (5.9)):

$$I_{\Phi}^A = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{400000000}{400000000} = 1. \quad (5.9)$$

Показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения определяется как сумма произведений балла критерия на его оценку. Интегральный показатель ресурсоэффективности рассчитан в таблице 13.

Таблица 13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий	Весовой коэффициент	Текущий проект	Аналог
1 Способствует росту производительности	0,15	5	3
2 Удобство в эксплуатации	0,15	4	3
3 Помехоустойчивость	0,05	4	4
4 Энергосбережение	0,2	5	2
5 Надежность	0,2	3	5
6 Материалоемкость	0,25	5	2
Итого	1	26	19

Расчет интегральных показателей ресурсоэффективности разработки и аналога приведен в формулах (5.10) и (5.11):

$$I_{\text{финр}}^p = 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 = 4,4; \quad (5.10)$$

$$I_{\text{финр}}^a = 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,25 = 3. \quad (5.11)$$

Интегральный показатель эффективности разработки определяется по формуле (5.12):

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{4,4}{0,0003} = 19254. \quad (5.12)$$

Интегральный показатель эффективности аналога определяется по формуле (5.13):

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a} = \frac{3}{1} = 3. \quad (5.13)$$

Сравнение интегральных показателей эффективности текущего проекта и аналога позволяет определить сравнительную эффективность проекта  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  (формула (4.14)):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{19254}{3} = 6418. \quad (5.14)$$

Результаты расчетов сравнительной эффективности проекта приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Сравнительная эффективность проекта

Показатели	Аналог	Разработка
Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,0003
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3	4,4
Интегральный показатель эффективности	3	19254
Сравнительная эффективность проекта	6418	

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1 Брыляков Н.С. Определение действующего значения расстояния между электродами при электрохимическом рафинировании отработавшего ядерного топлива [Электронный ресурс] / Н.С. Брыляков, С.Н. Ливенцов // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 3–6 июня 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); под ред. А.Н. Дьяченко [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C49/067.pdf>, [С. 91]. – Заглавие с титульного экрана. – Свободный доступ из сети Интернет.

2 Брыляков Н.С. Разработка модели и системы управления процессом в печи карботермического синтеза ядерного топлива в проекте «ПРОРЫВ» [Электронный ресурс] / Н.С. Брыляков, С.Н. Ливенцов // VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, 19-21 октября 2016 года, г. Северск / Северский технологический институт НИЯУ МИФИ; под ред. М.Д. Носков. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. URL: [http://www.aes.tomsk.ru/files/doc/sbornik\\_mac\\_2016.pdf](http://www.aes.tomsk.ru/files/doc/sbornik_mac_2016.pdf), [С. 143]. – Заглавие с титульного экрана. – Свободный доступ из сети Интернет.