

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Кафедра Техническая физика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Спекание таблеток диоксида урана в высокотемпературных печах
УДК 621.762.2:661.87:66.048

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Д	Истомин Олег Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Бутов В.Г.	д.ф-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. Менеджмент	Сечина А.А.	к.х.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Гоголева Т.С.	к.ф-м.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
«Техническая физика»	Шаманин И.В.	д.ф-м.н		

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Кафедра Техническая физика

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ « ____ » И.В. Шаманин

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Д	Истомин Олег Владимирович

Тема работы:

Спекание таблеток диоксида урана в высокотемпературных печах	
Утверждена директором ФТИ	№538/с от 29.01.2016

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

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Исследовать процесс производства топливных таблеток на стадии спекания и ознакомиться с современными подходами к спеканию топливных таблеток из порошка диоксида урана керамического типа в высокотемпературных печах в атмосфере водорода.
---------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	При разработке бакалаврской работы должны быть рассмотрены следующие вопросы: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Исследование процесса спекание. ➤ Создать инженерную модель этого процесса. ➤ Провести эксперимент по известным параметрам. ➤ Экономическое обоснование проведения НИР.
-------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Экспериментальная часть	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент кафедры «Менеджмент» А.А. Сечина
Социальная ответственность	Ассистент кафедры «Прикладная физика» Т.С. Гоголева

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. ТФ ФТИ	Бутов В.Г.	д.ф-м.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Д	Истомин Олег Владимирович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Д	Истомин Олег Владимирович

Институт	ФТИ	Кафедра	Техническая физика
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	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	1. Норматив заработной платы 2. Стоимость расходных материалов
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	1. Коэффициенты для расчета заработной платы

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Планирование и формирование бюджета научных исследований	1. Структура работ в рамках научного исследования 2. Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования 3. Бюджет научно-технического исследования
2. Разработка календарного план-графика выполнения ВКР	1. Определение показателя технической готовности темы, длительности этапов, коэффициента календарности и продолжительности работ 2. Построение календарного план графика проведения ВКР
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	1. Определение коэффициента социально-научного эффекта НИР 2. Определение коэффициента научно-технического эффекта дипломной работы 3. Оценка ресурсной эффективности НИР

Перечень графического материала:

1. Календарный план-график выполнения ВКР

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. Менеджмент	Сечина А.А.	к.х.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Д	Истомин Олег Владимирович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Д	Истомин Олег Владимирович

Институт	ФТИ	Кафедра	ТФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды 	<ul style="list-style-type: none"> – вредных факторов работы: электромагнитные поля, ионизирующее излучение, метеоусловия, микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения, – опасных факторов работы: вероятность поражения электрическим током, пожаро-взрывоопасность.
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>Электробезопасность, пожарная безопасность, требования безопасности при работе на ПЭВМ.</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты – (коллективные и индивидуальные защитные средства)
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</p>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (источники, в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаробезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т. С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Д	Истомин Олег Владимирович		

Оглавление

Реферат.....	8
Определения.....	9
Обозначения и сокращения	10
Введение	11
1. Приготовление пресспорошка	13
1.1. Смешивание компонентов	13
2. Спекание топливных таблеток	16
2.1. Математическая модель спекания топливных таблеток.....	16
2.2. Оптимизация режимов спекания.....	28
3. Полная компьютерная модель процесса тепломассообмена топливной таблетки при произвольном расположении в лодочке при спекании в высокотемпературных печах	32
3.1. Физическая формулировка задачи.....	33
3.2. Основные уравнения, используемые при описании тепломассообмена топливной таблетки в процессе спекания.....	35
3.3. Теплофизические свойства диоксида урана.....	38
3.4. Экспериментальные данные о процессе спекания.....	41
3.5. Теплофизические свойства водорода	43
4. Инженерная модель спекания применительно к многозонным печам	44
4.1. Описание математической модели укладки таблеток	45
4.2. Определение эффективных термодинамических характеристик укладки таблеток	47
4.3. Геометрическая модель укладки таблеток.....	48
4.4. Программная реализация инженерной модели	53
5. Верификация используемых в расчете моделей конечно-объемной модели спекания	56
5.1. Верификация инженерной модели спекания.....	56
5.2. Верификация конечно-объемной модели спекания	57
6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	60
6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	60
6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	60
6.1.2 SWOT-анализ.....	60
6.2 Планирование научно-исследовательской работы	61
6.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	61
6.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР.....	62
6.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	62
6.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	64
6.3.1 Расчет материальных затрат	65
6.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы	65

6.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	67
6.3.5 Накладные расходы	67
6.3.6 Контрагентные расходы.....	68
6.3.7. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	68
6.3.8 Расчет затрат на научные и производственные командировки	68
6.3.9 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	69
7. Социальная ответственность	69
7.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	69
7.2. Требования к ПЭВМ и организация работы.....	71
7.2.1. Организационные мероприятия	71
7.2.2. Технические мероприятия.....	72
7.2.3. Условия безопасной работы.....	74
7.3. Электробезопасность	76
7.4. Пожарная безопасность.....	77
Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок.....	79
Действие электрического тока на организм человека.....	79
Выводы	81
Заключение	82
Список использованных источников	83
Приложение А.....	86

Реферат

Выпускная квалификационная работа:

Ключевые слова: диоксид урана, топливная таблетка, спекание, высокотемпературные печи, моделирование.

Бакалаврская работа посвящена изучению современных подходов к производству топливных таблеток для снаряжения тепловыделяющих элементов и сборок. Основное внимание обращено процессам спекания спрессованных из порошка диоксида урана топливных таблеток в высокотемпературных печах, проходящих в атмосфере водорода.

В процессе выполнения работы изучена программа - «Инженерная модель спекания в печах ВТУ», разработанная в НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета. Программа предназначена для получения прогноза по спеканию топливных таблеток диоксида урана по входным данным, полученным после прессования. После ознакомления с программой проведены расчеты.

Целью данной работы является освоение современных подходов к спеканию топливных таблеток из порошка диоксида урана керамического типа в высокотемпературных печах в атмосфере водорода.

В ходе реализации задачи по созданию инженерной модели, способной оперативно предсказывать характеристики спекаемых таблеток, были рассмотрены математические постановки задачи, а также дополнительные данные необходимые для моделирования физических процессов, происходящих в таблетке при спекании.

Область применения: полученные данные помогут повысить контроль параметров и повысить качество производимых топливных таблеток.

В будущем планируется продолжить исследования в данной области, для промышленного комплекса производства топливных таблеток из порошка диоксида урана.

Определения

Диоксид урана химически и термически устойчивое (температура плавления 2760 °С) соединение урана с кислородом (UO_2), что обусловило его выбор в качестве ядерного топлива реакторов.

Пресспорошок – порошок или гранулированный материал, предназначенный для переработки в изделия методом прессования.

Спекание — в технике, процесс получения твёрдых и пористых материалов (изделий) из мелких порошкообразных или пылевидных материалов при повышенных температурах и/или высоком давлении; часто при **спекании** меняются также физико-химические свойства и структура материала.

Верификация – проверка, проверяемость, способ подтверждения с помощью доказательств каких-либо теоретических положений, алгоритмов, программ и процедур путём их сопоставления с опытными (эталонными или эмпирическими) данными, алгоритмами и программами.

Закись–окись урана —неорганическое бинарное соединение урана с кислородом, в котором металл имеет двойственную валентность. Брутто-формула: U_3O_8 . Основной компонент урановых концентратов в составе топлива для ядерных реакторов.

Обозначения и сокращения

НТИ – научно-техническое исследование.

$p_{кр}$ – критическое давление

$p_{пр}$ – давление пресования

$p_{упл}$ – давление уплотнения

$d_{кр}$ – критический диаметр

P_0 – исходная пористость

h – высота прессовки

Введение

Ядерная энергетика стала одной из основных составляющих общемировой энергетики. В различных странах отношение к ней определяется энергетическими ресурсами и экологической обстановкой. Поэтому в одних странах происходит расширение ядерной энергетики, в других - полное ее запрещение. Но общие тенденции развития энергетики показывают, что органическое топливо имеет ограниченные запасы и когда-то оно иссякнет. Огромные запасы солнечной энергии пока не удастся использовать столь экономически эффективно, как тепловую и ядерную энергию. Следовательно, ядерной энергетике просто нет альтернативы. Пока не ясно, какой она будет: основанной на распаде тяжелых элементов или на синтезе легких. Это покажет будущее. В проектируемых энергетических реакторах в качестве основным топливом будет использоваться топливо из карбидов и нитридов урана, плутония и тория.

Спекание карбидов и нитридов можно осуществить при помощи металлов и оксидов. В первом случае уменьшается термическая устойчивость композиции, во втором – уменьшается теплопроводность керамики.

Однако еще долго будут использоваться ядерные реакторы на топливе из диоксида урана.

Диоксид урана – вещество, уникальное во многих отношениях, и поэтому знание его свойств и технологии необходимы специалистам, работающим в области атомной энергетики.

Во-первых, диоксид урана стоит в ряду многочисленных оксидов, изучение которых продолжается. Чем больше изучают оксиды, тем большее количество фаз обнаруживается.

Во-вторых, диоксид урана – нестехиометрическое соединение. Осознание этого факта приводит к тому, что нет необходимости получать вещество с определенной химической формулой, а надо получить вещество, отвечающее техническим требованиям и фазовому составу. Диоксид урана пирофорен, это обстоятельство определяет требование к технологии и к правилам обращения с веществом.

В-третьих, технология получения диоксида урана – это особенная специфическая наука, она похожа на прочие технологические процессы, но существенно отличается тем, что это может быть ядерно – опасный материал вследствие обогащения по изотопу урана-235.

В-четвертых, конечным продуктом технологии являются керамические материалы на основе диоксида урана. Спекание керамики может производиться только в атмосфере, чаще всего в водородной. Это обстоятельство тоже накладывает отпечаток на весь технологический цикл. Процесс формирования и спекания, которые происходят с участием твердой фазы, требуют знания технологии обращения с порошками.

И, наконец, скорость химических процессов и спекания, протекающих в твердом теле, предполагает знание основ гетерогенной кинетики.

Целью данной работы является освоение современных подходов к спеканию топливных таблеток из порошка диоксида урана керамического типа в высокотемпературных печах в атмосфере водорода. В работе приводится описание процессов: подготовка пресспорошка, спекания. Разработка инженерной модели. А также финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение и социальная ответственность.

1. Приготовление пресспорошка

1.1. Смешивание компонентов

В нынешних условиях производства на стадии смешивания компонентов закладывают конечное качество топливных таблеток, так как подобие свойств как таблеток партии, так и между таблетками одного замеса зависит от макро-однородность прес-порошка.

Следовательно, цель смешивания - превратить агломераты частиц твердых компонентов при начальном произвольном распределении между собой в макро-гомогенную смесь. Скорость, а также результат смешивания во многом зависит от формы и величины частиц, геометрического состава (общего и каждого компонента в отдельности), числа смешиваемых компонентов и соотношения их количеств, плотности компонентов и их различия, коэффициента трения между частицами, их способности к слипанию и уплотнению, степени изменения геометрического состава при смешивании. Качество смешивания напрямую зависит от конструкции смесителя, а в частности от скорости, траектории перемещения частиц и изменение геометрического состава частиц в результате давления и трения компонентов.

Смешивание – процесс случайный, в связи с этим соотношения смешиваемых компонентов в отдельных небольших объемах в разные моменты смешивания должны быть вероятностной величиной. В пределе же достигается состояние, в котором все компоненты распределены случайно в их общем объеме так, что они имеют одинаковую вероятность нахождения в каком-либо макрообъеме смеси[1].

При производстве таблеток из двуокиси урана используется последовательно сухое смешивание диоксида урана с добавками и смешивание полученной шихты с раствором пластификатора. Для начала смешивают порошок диоксида урана UO_2 с теоретической плотностью $10,97 \text{ г/см}^3$, закись-окись урана U_3O_8 с плотностью $\sim 8,6 \text{ г/см}^3$, поро-образователь – азодикарбонамид

(C₂H₄O₂N₄) с плотностью 1,2 г/см. Смешивание в сухую проводится в контейнере V=330 л, с горловиной конусного вида. Заполнение контейнера не более двух третей объема, масса смеси в таком случае не будет превышать 500 кг. Далее контейнер помещают в установку, вращающую его со скоростью 15 об/мин в двух плоскостях не менее 70 минут.

Для того чтобы проверить смесь на однородность было проведено взятие проб на содержание углерода. Отклонение от среднего арифметического в процентах для каждого результата анализа рассчитывали по формуле [2]:

$$\delta = \frac{a_i - \bar{a}}{\bar{a}} * 100 \quad (1.1)$$

На рисунке 1.1 показана зависимость среднеквадратичного отклонения от времени смешивания, имеющая выраженный экспоненциальный характер.

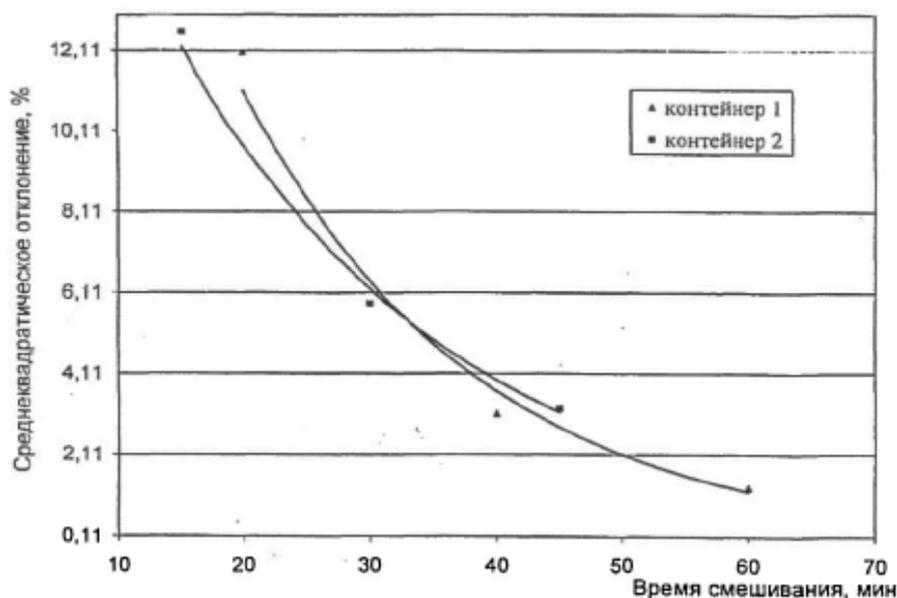


Рисунок 1.1 - Зависимость среднеквадратичного отклонения от времени смешивания

Еще одно затруднение, возникшее при замесе – налипание порошка на стенки смешивающей установки, которое имело место и при сухом, и при мокром смешиваниях. Для решения этой проблемы было предложено использование коническую пластиковую вставку, что позволило несколько снизить налипание на стенки, но проблема не решена полностью. В силу того, что имелся разброс значений среди максимальных отклонений от среднего на одинаковых режимах, то для поиска наилучшей конструкции были опробованы роторы с углом наклона лопаток 60° и направлением их только вверх и вверх и вниз. Несмотря на лучшее качество смешивания при использовании ротора с разными направлениями лопаток, чем с лопатками, направленными в одном направлении – вверх, имеется отрицательный фактор, заключающийся в большом налипании порошка на стенках и даже уплотнении порошка там, где лопатки направляют продукт вниз. Также был опробован ротор с углом наклона лопаток 30° и направлением их вверх [3].

На основе полученных данных рекомендовано использовать ротор с лопатками под углом 60 градусов, направленными вверх. В этом случае качество смеси удовлетворительное, среднеквадратичное отклонение по 10 пробам в каждом замесе мало, разницы между средними значениями содержания углерода для всех замесов близки друг к другу, что указывает на стабильность процесса смешивания компонентов. На стенки смесителя не налипает большого количества материала, его остатки выглядят не уплотненными, как при использовании других роторов.

Налипание порошка на стенки смесителя, вредный фактор, который ведет к преждевременному износу оборудования, а также сказывается на качестве полученных таблеток. Для оценки этого влияния было проведено два замеса. Смесь, свободно высыпается из смесителя (далее обозначается - I) и смесь после зачистки внутренней поверхности смесителя (далее обозначается — II), были собраны в разных емкостях. Далее были сделаны таблетки на одинаковых режимах.

От каждой смеси отобраны по 5 проб для определения содержания углерода; после изготовления таблеток, были отобраны пробы на химический анализ, а именно плотность (20 таблеток) и доспекаемость (10 таблеток). При проведении хим. анализа было определено, что увеличилось содержание железа в спеченных таблетках по сравнению с исходным порошком: в исходном порошке 42 ppm, в смеси I – 54 ppm, в смеси II – 97 ppm [4].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Все данные удовлетворяют требованиям.
2. Распределение значений по плотности и доспекаемости по второму варианту несколько хуже по сравнению с первым вариантом;
3. На всех вариантах произошло увеличение содержания железа, что свидетельствует об износе лопастей ротора при смешивании.

2. Спекание топливных таблеток

2.1. Математическая модель спекания топливных таблеток

Спеченным таблеткам предъявляются жесткие требования по геометрическим размерам, плотности и другим характеристикам. За долгое время накоплен существенное количество экспериментального материала по технологии топливных таблеток для тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, а также большое количество аналитических моделей, описывающих отдельные ее этапы [5]. С целью получения стабильных результатов по плотности спеченных топливных таблеток в большинстве известных способов предлагается понижать активность порошков к спеканию различными приемами: на пример уплотнять начальный порошок с помощью высоких давлений, а прессовки, сформованные при давлениях выше 3 т/см^2 , спекать при температурах не менее $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ [6]; интенсивно уплотнять порошок его обработкой стальными шарами [7]; отжигать приготовленные гранулы порошка в атмосфере CO_2 при температурах от 600 до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ [8]; создавать

дополнительное количество «крупных» пор в спеченной таблетке путем введения образователя пор (0,3 - 1,4 % масс.), сублимирующих при температурах не выше 600 °С [9].

Все вышеупомянутые способы регулировки плотности спеченной таблетки за счет повышения части «пассивной» пористости в прессовке и могут успешно использоваться при заданном значении плотности спеченной таблетки не более 94 % от теоретической. Формирование пор с заданными значениями диаметра зависит от многих факторов, процесс вероятностного характера и практически не поддается управлению. В связи с этим все известные способы регулирования и стабилизации плотности таблеток после спекания, основанные на увеличении пассивной части пористости, уменьшают величину СКО значений плотности спеченных таблеток, одновременно снижая сами показатели плотности.

Предложенная математическая модель позволяет без применения добавки образователя пор добиться получения таблеток ядерного топлива с заданными значениями плотности вплоть до 98 % от теоретической, а также требуемых геометрических размеров таблеток, снизив тем самым припуск на шлифование, брак по плотности и геометрическим размерам. Эта модель позволяет устанавливать параметры предварительного уплотнения для подготовки пресс-порошка, прессования и спекания [10, 11].

Прессование обеспечивает плотность прессовки $\gamma_{п}(p)$, при которой значение объемной доли «пассивных» пор $\varepsilon_{п}(T)$ позволяет получить заданное значение плотности спеченной таблетки $\gamma_{с}$:

$$\gamma_{с} = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_{т}} + \frac{\varepsilon_{п}(T)}{\gamma_{п}(p)}}, \quad (2.1)$$

где $\gamma_{т}$ – теоретическая плотность спеченной таблетки;

p – давление прессования;

T – температура спекания.

Надежность и эффективность работы твэлов атомных реакторов обеспечивается созданием в структуре топливных таблеток равномерного распределения пор определенного размера, которое задается техническими условиями путем установления номинального значения плотности.

Объемная доля пор (пористость) прессовки составляет:

$$\varepsilon_0(p) = \frac{v_0}{V_{\text{п}}} = 1 - \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{тс}}}, \quad (2.2)$$

где v_0 – суммарный объем пор;

$V_{\text{п}}$ – объем прессовки;

$\gamma_{\text{тс}}$ - теоретическая плотность смеси порошка UO_2 с пластификатором (пресспорошка).

Условно (в зависимости от температуры спекания) объем пор в прессовке:

$$v_0 = v_a + v_{\text{п}}, \quad (2.3)$$

можно разделить на две части: «активную» пористость объемом, v_a схлопывающуюся при спекании

$$\varepsilon_a(p) = \frac{v_a}{V_{\text{п}}} = 1 - \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{с}}}, \quad (2.4)$$

и «пассивную» пористость объемом $v_{\text{п}}$, которая при спекании не изменяется

$$\varepsilon_{\text{п}}(p) = \frac{v_{\text{п}}}{V_{\text{п}}} = \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{с}}} \left(1 - \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{тс}}}\right), \quad (2.5)$$

Экспериментальные исследования показывают, что плотность спеченных таблеток стохастически зависит от плотности прессованных таблеток. Представленная на рисунке 2.1 кривая,

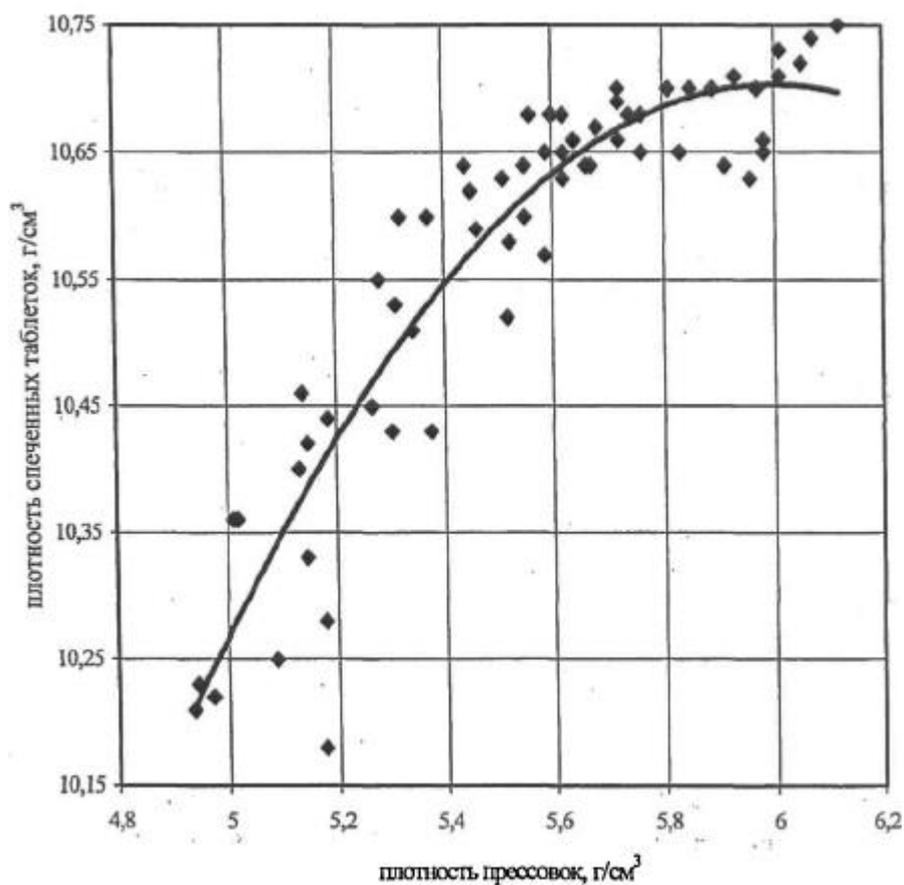


Рисунок 2.1 – Экспериментальная зависимость плотности спеченных таблеток от плотности прессовок

полученная для конкретной партии пресс-порошка (исходный порошок получен методом химического восстановления через аммонийдиурат, таблетки прессовались на гидравлическом прессе), может аппроксимироваться уравнением 2-го порядка вида:

$$\gamma_c = a\gamma_{п}^2 + b\gamma_{п} + c \quad (2.6)$$

для которого эмпирические коэффициенты равны:

$$a = -0,48, b = 5,70 \text{ и } c = -6,22,$$

и уравнение (5.6) приобретает вид:

$$\gamma_c = -0,48\gamma_{п}^2 + 5,70\gamma_{п} - 6,22 \quad (2.7)$$

Подставляя (2.4) в (2.7) получим зависимость, графическая интерпретация которой представлена кривой 1 на рисунке 2.2.

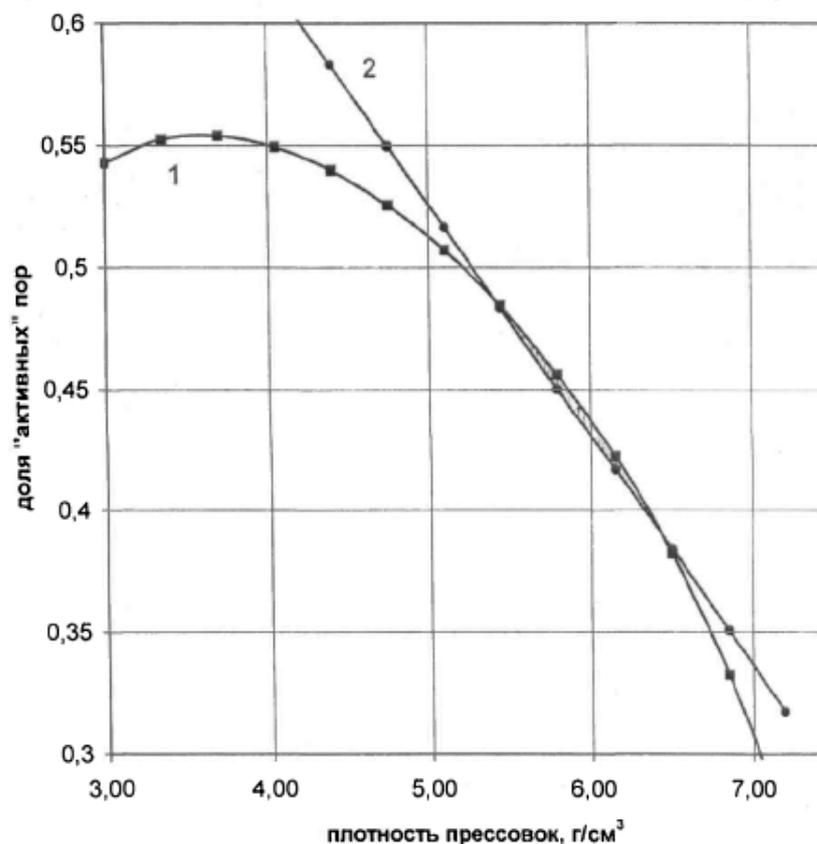


Рисунок 2.2 – Расчетные зависимости доли «активных» пор от плотности прессовок

Для некоторых видов производимых в России топливных таблеток номинальное значение величины γ_c равно $10,55 \text{ г/см}^3$. Подставив это значение в (5.4), получим линейную зависимость доли активных пор γ_n , при которой плотность γ_c будет приобретать номинальное значение $10,55 \text{ г/см}^3$. Такая зависимость представлена прямой 2 на рисунке 2.2.

Прямая 2 пересекается с кривой 1 в точках с абсциссами $\gamma_n=5,4 \text{ г/см}^3$ и $\gamma_n=6,4 \text{ г/см}^3$, что соответствует требованиям диапазона плотности прессовок, регламентируемым в различных технологических процессах.

Величины относительной доли «активных» пор, соответствующие точкам кривой 1, лежащим под расчетной прямой 2 (рисунок 2.2), оценивают тот интервал плотности прессовок, при котором в последующем нельзя достичь требуемой номинальной плотности спеченной таблетки. Рабочий диапазон

значений доли «активных» пор (диапазон плотности прессовок) должен находиться не ниже соответствующей расчетной прямой. Наличие зоны, расположенной ниже кривой 1, но выше прямой 2 (рисунок 2.1, заштрихованная область), подтверждает то что возможна большая «активность» пор, чем необходимо для достижения плотности спеченной таблетки, равной $10,55 \text{ г/см}^3$. Для понижения плотности спеченной таблетки в этой зоне существуют различные технологические приемы.

Наиболее простым является снижение плотности прессовки путем изменения давления прессования. Но при этом возможно уменьшение диаметра спеченной таблетки, что повлечет за собой необходимость изменения (увеличения) диаметра дорогостоящего и трудоемкого в изготовлении пресс-инструмента. Поэтому на практике больше распространено использование выгорающих добавок, образующих поры, изменяющих соотношение долей «активной» и «пассивной» составляющих пористости в пользу «пассивной». Степень изменения можно изменять количеством образователя пор.

Значение γ_c , полученное по уравнению (2.7), может быть разным для разных порошков, разных схем прессования и режимов спекания, что позволяет сравнить эффективность технологий по конкретным исходным свойствам порошков с точки зрения присутствия наибольшей «активности» пор, а также предлагать решения по их оптимизации.

Усадка таблетки при спекании происходит по причине исчезновения «активных» пор и, вероятно, уменьшению объема крупных пор; если бы все поры были «активными», то при спекании достигали бы теоретическую плотность UO_2 $10,96 \text{ г/см}^3$. Для номинальной плотности спеченной таблетки, равной $10,55 \text{ г/см}^3$, неактивная доля пористости прессовки при $\gamma_n = 5,7 \text{ г/см}^3$, рассчитанная по формуле (2.5), равна $\sim 2 \%$.

Из рисунка 2.3 следует, что для модели (2.4) при плотности прессовки $\gamma_n = 3,55\text{-}3,65 \text{ г/см}^3$ видна максимально возможная доля «активных» пор (для порошка UO_2 и технологии получения прессовок) и возможно максимальный прирост плотности таблеток при остальных равных условиях спекания. Но в

связи с тем, что начальная плотность ($3,5-3,6 \text{ г/см}^3$) мала, следовательно наибольший прирост плотности при спекании не обеспечивает номинального требуемого значения.

Например, если предположить, что зависимость плотности спеченной таблетки от плотности прессовки аппроксимируется параболой второй степени, то получаем, что экстремум будет определяться условием:

$$\gamma_{\text{п}} = \sqrt{\frac{c}{a}} \quad (2.8)$$

где a и c - соответственно параметры уравнения параболы общего вида, описанного уравнением (2.6). В этом случае по уравнению (2.8) величина плотности прессовок, при которой доля «активных» пор будет максимальна, равна $3,6 \text{ г/см}^3$.

Выбор типа аппроксимирующего уравнения может базироваться на физических представлениях изложенных, например, в работах [12, 13].

Приведенные выше данные дают дополнительную информацию при разработке технологий различного типа порошковых изделий. А также, можно сравнивать эффективность разных технологий, например, оценить отличие «мокрой» и «сухой» технологии при производстве топливных таблеток из UO_2 .

На рисунке 2.3 приведены зависимости плотности спеченных таблеток от плотности прессовок, полученных по «сухой» технологии, на различном оборудовании: 1 - обработка в шаровой вибромельнице, 2 - обработка в центробежно-роторной мельнице. Соответствующие зависимости доли «активных» пор от плотности прессовок приведены на рисунке 2.4. Полученные данные говорят о том, что, меняя режим подготовки пресспорошка и прессования таблеток, можно целенаправленно управлять долей «активных» пор, т.е. регулировать эффективность технологического процесса.

В модели (2.4) пренебрегаются размерами пор, что является ее существенным недостатком. Но, предположив, что в спеченной таблетке содержится некоторое количество (n) пор со средним диаметром d , то можно допустить, что такое же количество пор (n), но со средним диаметром D ,

большим чем d , содержалось и в прессовках. Изменение среднего диаметра пор при спекании от D до d (если оно имело место) не может обеспечить полной усадки таблетки при спекании, так как доля таких пор согласно (5.6) составляет около 2 %. Видимо, усадку прессовки при спекании обеспечивает, по-видимому, другая группа пор со средним диаметром D' , которые относятся к «активной» пористости и удаляются при спекания. (2.8)

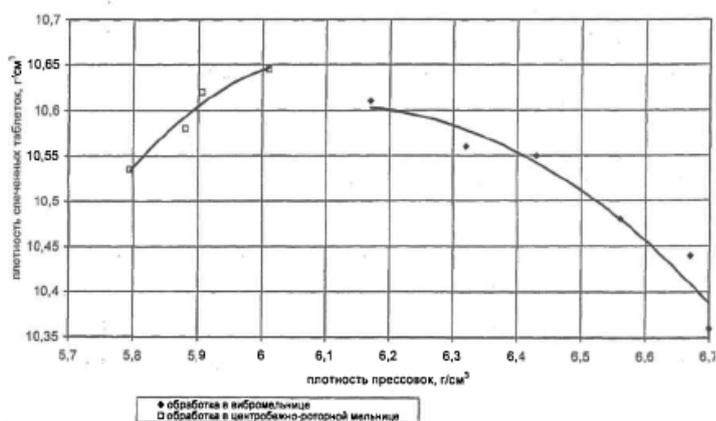


Рисунок 2.3 - Экспериментальные зависимости плотности спеченных таблеток от плотности прессовок при различных режимах

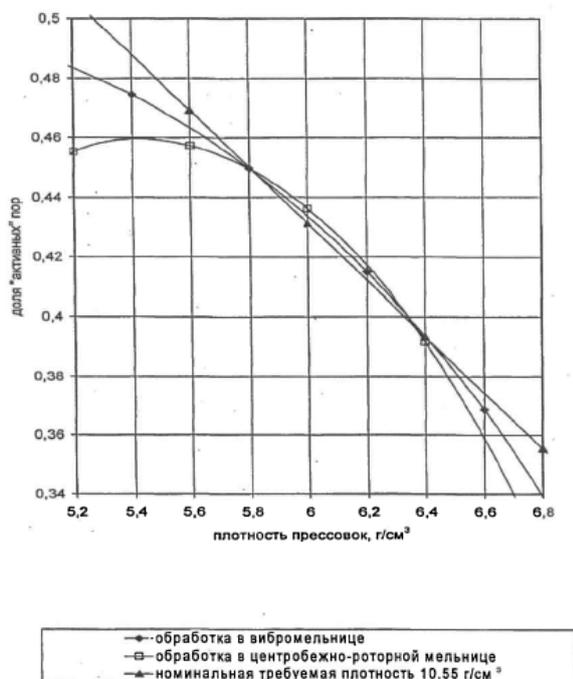


Рисунок 2.4. Расчетные зависимости доли «активных» пор от плотности прессовок

Деформация всего объема пористости в процессе прессования навеске порошка, уменьшая тем самым ее объем, а при спекания прессовки исчезает лишь небольшая часть общего объема пористости - «активная» пористость, диаметр пор которой меньше некоторого критического значения $d_{кр}$. Значение $d_{кр}$ является функцией температуры спекания прессовки и времени изотермической выдержки. Например, для температуры меньше 800°C почти все поры в прессовке «пассивны» и $d_{кр}=0$. При повышении температуры значительное количество пор переходит в разряд «активных» и испытывает деформацию под действием поверхностного натяжения. При достижении 1750 °С, лишь малая доля пор, эквивалентный диаметр которых $d_э > d_{кр}$ (1750 °С), остаются в разряде «пассивных», обеспечивая конечную плотность спеченной таблетки.

При спекании изделий из порошка UO_2 зарастанию и исчезновению подвергаются поры с диаметром $d < 2$ мкм, которые составляют объем «активных» пор v_a , см³. Поры крупнее, при спекании меняющиеся не значительно относительно своего суммарного объема, являются «пассивными» и составляют объем v_p , см³. Верхняя граница диаметра установлена требованиями к спеченной таблетке и варьируется в пределах от 100 до 500 мкм.

По всей вероятности, размеры пор в прессованной таблетке зависят от размеров первоначальных пустот в порошке, а также от их деформации в момент прессования. В порошках, у гранул которых теоретическая плотность материала, например, металлических, размеры первоначальных пустот определяются формой, размерами и степенью упаковки гранул при заполнении пресс-формы. Варианты размерных характеристик первоначальных пустот керамических порошков, плотность гранул в которых меньше теоретической плотности материала, т.е. имеющих внутреннюю пористость, будут расширяться за счет размеров внутренней пористости гранул.

Как было сказано ранее, порошки двуокиси урана состоят, в большинстве своем, из частиц шарообразной формы с размерами от 30 до 500 мкм,

представляющих собой слияние множества агломератов, и их форма стремится к шарообразной с ростом их размеров; сами агломераты составлены из кристаллических решеток неправильной формы [14]. Для порошков с такой сложной структурой характерна неудовлетворительная текучесть и низкие значения насыпной плотности, что подталкивает потребителей к рассмотрению различных технологических приемов, необходимых для снижения внутренней пористости в порошке.

В результате такой первичной подготовки порошков повышается их текучесть и насыпная плотность, а объемная доля пористости между гранул существенно не изменяется. Для пресс-порошка, используемого в производстве топливных таблеток из UO_2 , объем пористости внутри гранул более чем на порядок увеличивает объем пустот между гранул. Следовательно, в процессе прессования становится меньше как объем пористости между гранул, формируя «пассивные поры», так и объем пор внутри гранул, создавая преобладающее количество «активных» пор. Степень уменьшения объемной доли «пассивных» пор будем характеризовать показателем объемной деформации $Z_p(p)$, представляющим собой коэффициент пропорциональности в соотношении:

$$\varepsilon_0(p) = Z_0(p)\varepsilon_0^p \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_a(p) = Z_a(p)\varepsilon_a^p \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_p(p) = Z_p(p)\varepsilon_p^p \quad (2.11)$$

где $Z_i(p)$ – функция деформации пористости конкретного функционального назначения.

Следует, что

$$Z_0(p) = \frac{\gamma_{тс} - \gamma_p(p)}{\gamma_{тс} - \gamma_{нас}} \quad (2.12)$$

$$Z_a(p) = \frac{\gamma_{т}\gamma_{г}(\gamma_{с} - \gamma_p(p))}{\gamma_{с}\gamma_{т}(\gamma_{с} - \gamma_{г})} \quad (2.13)$$

$$Z_p(p) = \frac{\gamma_p(p)\gamma_{г}(\gamma_{т} - \gamma_{с})}{\gamma_{с}\gamma_{т}(\gamma_{г} - \gamma_{нас})} \quad (2.14)$$

Графические зависимости, полученные при подстановке экспериментальных результатов в (2.12), (2.13) и (2.14), показаны на рисунке 2.5. Воздействие начальных параметров на расчетные показатели объемной деформации указаны в таблице 2.1. Давление изменяется от 0 до 0,5 т/см² не вызывая при этом уменьшения объема «активных» пор группы v_a , но за счет уменьшения общего объема V_{Π} происходит увеличение показателя $Z_a(p)$. По этому, до величины давления 0,5 т/см³ происходит значительное уменьшение объемной доли «пассивных» пор v_{Π} и пропорциональное увеличение объемной доли «активных» пор v_a . Вероятнее всего, на данном участке работа давления тратится на преодоление сил трения и электростатического притяжения до получения плотной упаковки частиц в навеске гранулята до некоторой плотности γ_0 , г/см³, функции деформации $Z_i(p)$ с большой точностью можно показать уравнением прямой линии вида

$$Z_i(p) = a_i - b_i p, \quad (5.15)$$

$$a_0 = \frac{\gamma_{тс} - \gamma_0}{\gamma_{тс} - \gamma_{нас}} = \frac{\varepsilon_0(p_0)}{\varepsilon_0^v} \quad (5.16)$$

представляет собой отношение пористости при упорядоченной упаковке частиц к пористости случайной (свободной) упаковки;

$$a_0 = \frac{\gamma_0}{\gamma_{нас}} \quad (5.17)$$

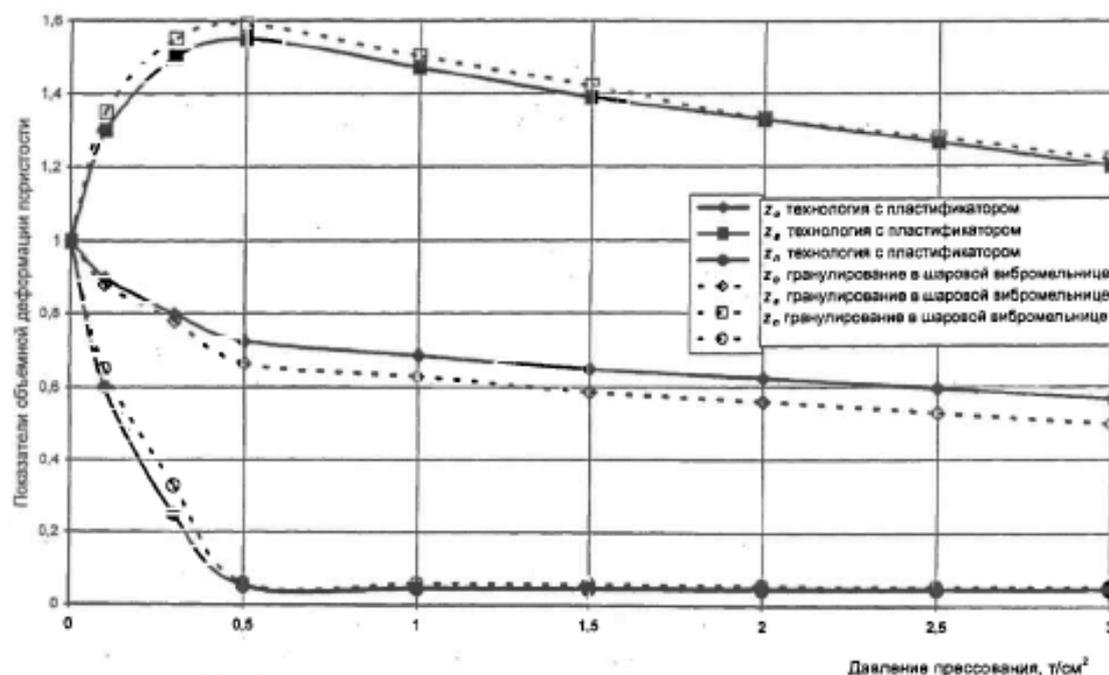


Рисунок 2.5 - Зависимости показателей объемной деформации от давления прессования

Таблица 2.1- Расчетные значения показателей объемной деформации (z_0 , z_a и z_n) в зависимости от исходных параметров (γ_r , $\gamma_{нас}$, $\gamma_n(p)$ и $\gamma_a(p)$)

Особенности технологии	Наименование и обозначение параметров	Давление прессования, p , т/см ²					
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Предварительное брикетирование, с добавкой жидкого пластификатора $\gamma_r = 5 \text{ г/см}^3$, $\gamma_{нас} = 3 \text{ г/см}^3$.	Плотность прессовки, γ_a , г/см ³	5,2	5,5	5,8	6,0	6,1	6,18
	Плотность спеченной таблетки, γ_n , г/см ³	10,56	10,58	10,6	10,61	10,61	10,61
	z_0	0,724	0,686	0,648	0,623	0,596	0,565
	z_a	1,548	1,47	1,39	1,33	1,265	1,199
	z_n	0,051	0,045	0,045	0,045	0,0448	0,0448
Гранулирование в шаровой вибромельнице, сухое прессование $\gamma_r = 6,17 \text{ г/см}^3$, $\gamma_{нас} = 3,7 \text{ г/см}^3$.	Плотность прессовки, γ_a , г/см ³	6,1	6,4	6,7	6,9	7,1	7,2
	Плотность спеченной таблетки, γ_n , г/см ³	10,52	10,55	10,58	10,60	10,60	10,59
	z_0	0,665	0,628	0,587	0,559	0,529	0,5
	z_a	1,591	1,501	1,42	1,332	1,278	1,217
	z_n	0,058	0,057	0,055	0,053	0,052	0,051

2.2. Оптимизация режимов спекания

Одной из важнейших операций является спекание топливных таблеток, в процессе этой операции образуются крепкие связи между частицами, обеспечивая таблеткам определенные механические и физико-химические свойства. Спекание проводится в атмосфере водорода при постепенном нагреве, в процессе которого происходит устранение связки; выдержка при высоких температурах завершает формирование топливной таблетки из диоксида урана с требуемыми свойствами.

Плотность прессованных таблеток варьируется в пределах 5,6 - 6,1 г/см³ (51 – 56 % теоретической плотности UO₂), уже спеченные таблетки имеют плотность 94 – 98 %. Изменения плотности спекаемых образцов из диоксида урана от температуры графически представлена на рисунке, и имеет вид S-образных кривых. Первый перегиб кривой при $T=0,48 T_{abc}$ (рисунок 2.6 [2]) соответствует началу быстрого роста плотности и объясняется диффузионным крипом с энергией активации 76 ккал/моль.

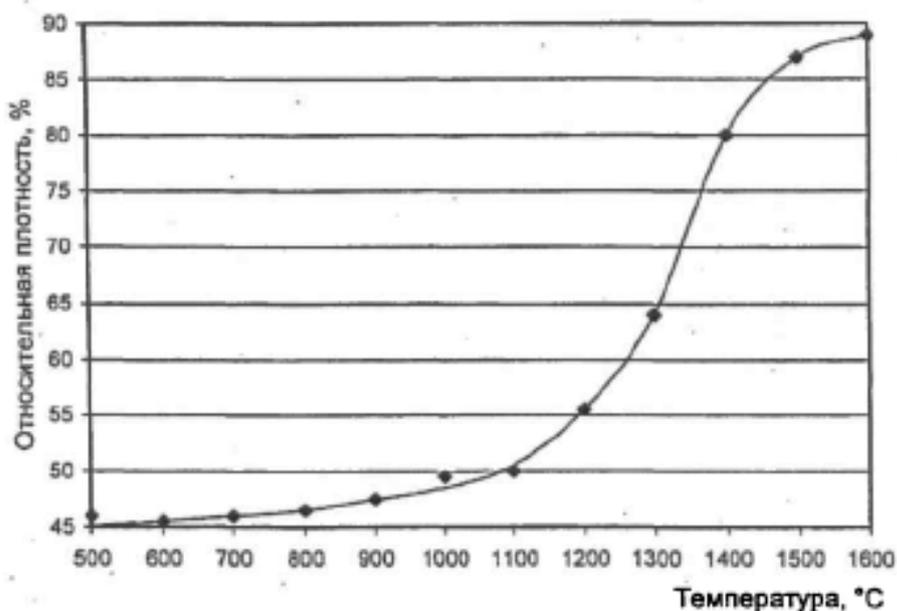


Рисунок 2.6 - Влияние температуры на усадку диоксида урана при спекании

Большую роль в процессе играет диффузия ионов кислорода в объеме материала усадки диоксида урана, ее скорость значительно больше скорости диффузии ионов урана (при 1750 °C энергия активации ионов урана равна 90–

125 ккал/моль, когда как энергия активации ионов кислорода при 1700 °С равна 29,7 ккал/моль [2]). Отношение O/U в начальном диоксиде урана варьируется в пределах 2,04-2,09, в спеченных в водороде таблетках близко к 2,00-2,03.

За счет диффузии происходит усадка прессовок ионов кислорода заметно проявляется при их избытке в составе спекаемого диоксида урана, особенно при использовании подшихтовки U_3O_8 . Так, подшихтовка 5–10 % масс. U_3O_8 к начальному порошку двуокиси урана повышает отношение O/U вплоть до 2,15,- активируя тем самым процесс спекания, а также позволяет уменьшить технологические отходы.

Создание структуры таблеток определяется ростом зерен в процессе спекания. При спекании в атмосфере водорода, еще до начала роста зерен материал прессовки восстанавливается до UO_2 стехиометрического состава, путем повышения продолжительности и температуры можно получить крупные зерна.

Спекание в окислительной среде в оксидах состава U_4O_{9-y} рост зерен осуществляется значительно быстрее, нежели в оксидах состава UO_{2+x} . Корректирование фазовой структуры таблетки в момент спекания дает возможность осуществить быстрый рост зерен без увеличения длительности или температуры спекания. А также, не требуется добавлять никакие посторонние добавки в исходный порошок двуокиси урана [14]. Во время спекания в окислительной среде по мимо двух параметров (времени и температуры) действует еще один - отношение кислорода к урану в процессе спекания, зависящий от интенсивности кислорода в окружающей среде — обеспечивает весьма эффективное и гибкое формирование микроструктуры спеченной таблетки.

Ввод добавки в виде U_3O_8 и переход к спеканию в низких температурах в окислительной среде с дальнейшим восстановлением в атмосфере водорода при температуре ниже 1600°С обеспечивает возможностью достичь требуемое значение плотности и внешней пористости таблеток после спекания при

заданной микроскопической структуре. Но такой вид спекания сложно осуществим в массовом производстве.

В основном спекают топливные таблетки в печах с тремя секциями и подом, шагающим с определенным интервалом. В первой секции обеспечивается отгонка связки, она содержит три температурные зоны. Задаваемая температура варьируется от 200°C в первой зоне до 800°C в третьей. В каждой зоне имеется отделенный нагреватель с термопарой, которая регистрирует температуру в центре зоны. Следующая секция предназначена для предварительного нагрева и состоит имеет две зоны с интервалом температур от 1000°C до 1200°C. Секция под номером три служит для высокотемпературного нагрева, где и происходит непосредственное спекание; содержит три зоны с режимом температур от 1700°C до 1770°C в данной секции спекаемые таблетки находятся более 6 часов, что дает требуемый размер зерен в готовой таблетке, заданную плотность и доспекаемость.

Противоположно движению лодочек с прессованными таблетками, подается водород. Поступающие на спекание прессовки в лодочках имеют перфорированные борта, высота свободной засыпки таблеток в лодку около 15 см.

От скорости нагревания таблеток и времени выдержки при необходимых температурах могут получить несколько типов отгонки пластификатора. Устранение связки проходит при температуре кипения и разложения составляющих. Наиболее «опасные» моменты при нагревании таблеток это агрегатные переходы составляющих связки, при которых начинается газовыделение. По этой причине, в этих температурных диапазонах необходим небольшой темп нагрева или выдержка во времени, чтобы не произошло бурного испарения кипящего компонента и появления дефектов таблеток после спекания. Учитывая это, чем диаметр таблетки больше, тем длительнее требуется выдержка или ниже темп нагрева.

Поливиниловый спирт наиболее «опасный» компонент пластификатора и требует достаточно большое время выдержки при медленном нагреве. Это определено тем, что диффузия молекул длинных углеводородов, получающихся при расщеплении, снижена и является лимитирующей стадией ликвидации из таблетки этого компонента. Малое время выдержки или высокий темп нагрева приведут к забивке каналов и пор, при высокотемпературном спекании может привести к оставлению крупных пор в таблетках, что приведет к понижению плотности после спекания.

Глицерин наиболее высококипящая составляющая. Критерий полноты устранения глицерина заключается в достаточной выдержке при необходимой температуре. В таком случае протекание полимеризации акролеина будет происходить на таблетках, а не внутри. А также, следует обратить внимание, что присутствует взаимодействие продуктов расщепления глицерина с продуктами расщепления поливинилового спирта с образующимися тяжелыми углеводородами, которые устраняются более высокими температурами. Так, присутствие глицерина тормозит устранение газообразных продуктов расщепления связки из таблеток в интервале температур 400-800°C. Температуры в первых трех зонах были понижены до 250, 350 и 500°C по зонам соответствующим зонам. В следствие этого градиент роста температуры (A) был снижен с 1,90 до 1,00°C/мин в первой зоне, остался неизменным 0,84°C/мин во второй зоне и в 1,52°C/мин третьей зоне и значительно возрос с 1,64 до 2,74°C/мин в четвертой.

Партия порошка массой ~ 3 т разделенная на две партии (примерно на 2 и 1 т - штатная и экспериментальная партии), из которых были получены топливные таблетки. Созданные партии таблеток подверглись жесткому контролю различных параметров.

Различия доспекаемости и плотности в различных слоях таблеток, уложенных в лодочке для спекания, невелико; в основном, таблетки, уложенные по центру загрузки имеют плотность на 0,02 г/см³ меньше из-за худших условий теплообмена; но эта величина меньше, чем погрешность определения 0,03 г/см³

для единичного измерения. Перфорация лодок обеспечивает хороший доступ водорода для удаления связки и проведения процессов восстановления.

Некое различие в плотности таблеток в разных партиях появилось из-за смены режимов - было повышено давление прессования, так как нужно было немного увеличить массу метрового столба таблеток в сравнение с его нижним пределом, составляющим 444 г.

Добавка U_3O_8 к начальному порошку диоксида урана составляла 10 % масс. Из этого следует что коэффициент по кислороду, исходя из содержания урана в начальном порошке 87,7 % и в закиси-окиси 84,6 %, равен 2,14, что больше стехиометрического. Следовательно, есть вероятность влияние лишнего кислорода в таблетках на диффузионные процессы. С учетом этих результатов, был проведен эксперимент, при котором таблетки спекались при температурах 550, 650, 750, 1000, 1100, 1700, 1720 и 1750 °С по зонам соответственно и градиентом подъема температур 2,34; 0,84; 1,01; 1,37; 0,92; 2,62; 0,14; 0,24 °С/мин. Полученные таблетки ничем не отличаются от штатной продукции; брак по внешнему виду брак составил 2,5 % , а на штатной продукции процент брака 3,4 %.

3. Полная компьютерная модель процесса тепломассообмена топливной таблетки при произвольном расположении в лодочке при спекании в высокотемпературных печах

Инженерная модель спекания топливных таблеток, разработка которой рассматривается в настоящем отчете, строится на основе разработанной ранее математической модели процесса тепломассообмена топливной таблетки при произвольном расположении в лодочке при спекании.

В данном разделе приводится краткое описание полной математической модели процесса тепломассообмена топливной таблетки при произвольном расположении в лодочке при спекании, разработанной в рамках договора № ТО-1/323 от 16.12.2011 г. и подробно описанной в отчете «Разработка

математической модели процесса тепломассообмена топливной таблетки при произвольном расположении в лодочке при спекании» [15].

3.1. Физическая формулировка задачи

В данном разделе отчета приведены результаты более детального исследования, относящиеся к изучению теплофизических и аэродинамических процессов, проходящих внутри лодочки с таблетками. Эта постановка предполагает возможность исследования процессов, связанных с химическими превращениями, проходящими в окрестности таблетки в укладке, такими как удаление связывающих компонент на начальной стадии спекания и изменение значения кислородного коэффициента в процессе спекания в присутствии водорода.

На рисунке 3.1 представлена схема печи BTU CNR с расположенными внутри лодочками.

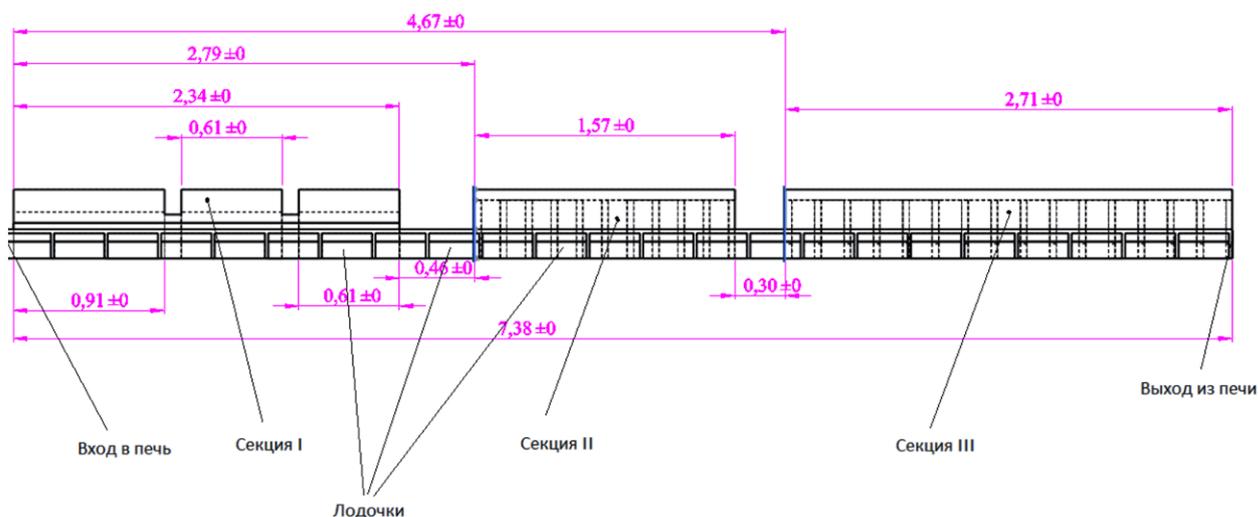


Рисунок 3.1– Схема печи BTU CNR

Лодочки движутся слева направо с осредненной скоростью 508 мм/ час. На боковых поверхностях каждой секции расположены нагревательные элементы, обеспечивающие заданный тепловой режим каждой секции. Распределение температуры нагревателей было выбрано следующим образом (см. рисунок 3.2).

В каждой секции (I, II, III) на поверхности боковых стенок печи задано постоянное распределение температуры в 550 °С, 1200 °С и 1765 °С соответственно. В процессе движения лодок в противоток им по секциям прокачивается водород с объемным расходом 80 л/мин для секций I и II, и 60 л/мин для секции III.

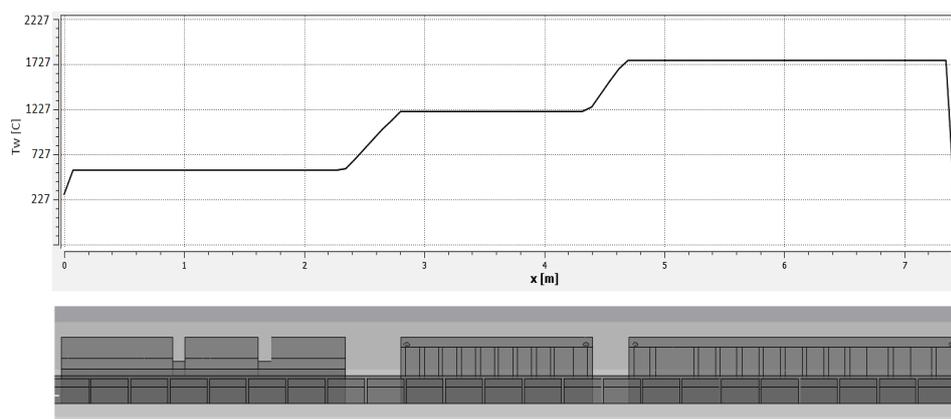


Рисунок 3.2– Распределение температуры по секциям печи

На рисунке 3.3 представлен внешний вид лодочки, заполненной таблетками. При этом считается, что данный тип укладки таблеток соответствует "упорядоченной укладке".



Рисунок 3.3– Лодочка, заполненная таблетками

3.2. Основные уравнения, используемые при описании теплообмена топливной таблетки в процессе спекания

Для математической постановки задачи, описывающий нестационарный процесс движения газовой среды вокруг лодочки и внутри нее с учетом всех видов теплообмена в трехмерном случае используются эйлеровы переменные x_i , $i=1,2,3$. Вектор скорости \vec{V} определяется компонентами u_i ($i=1,2,3$). Течение также характеризуется термодинамическими параметрами: давлением P ; плотностью газовой смеси ρ и температурой T .

Уравнение неразрывности газовой фазы имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \quad (3.1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_j u_k) = -\frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{\partial \tau_{jk}}{\partial x_k}. \quad (3.2)$$

Тензор вязких напряжений:

$$\tau_{jk} = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{jk} \frac{\partial u_j}{\partial x_k},$$

где: $\mu = \mu(T)$ – коэффициент вязкости;

$\delta_{jk} = 1$ для $j = k$ и $\delta_{jk} = 0$ при $j \neq k$.

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial (\rho h_0 - p)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k h_0) = \frac{\partial}{\partial x_k} (u_j \tau_{jk}) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_k} \right). \quad (2.3)$$

где: $h_0 = h + \frac{1}{2} V^2$, h - полная энтальпия и энтальпия газа.

Ввиду малых скоростей газа внутри расчетной области течение считается ламинарным.

Уравнение теплопроводности для твердых веществ, входящих в модель:

$$\frac{\partial(\rho_s C_{ps} T_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right), \quad (2.4)$$

где: ρ_s, C_{ps} – соответственно плотность и теплоёмкость материала стенки;

T_s – температура стенки;

λ_s – коэффициент теплопроводности твердого тела.

Для моделирования радиационного теплообмена на внешней поверхности твердой поверхности задается лучистый тепловой поток в окружающее пространство:

$$q_w = \tau \sigma T_s^4, \quad (2.5)$$

где: τ – степень черноты (зависит от материала);

$$\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4}.$$

Граничные условия для уравнений газовой динамики и теплопроводности определяются следующим образом.

На всех твердых поверхностях для вектора скорости газа задается условие $\vec{V} = 0$. На внутренних поверхностях стенок печи, не являющихся нагревателями задается условие теплоизоляции $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$. На тех поверхностях, где стоят нагреватели, задается $T = T_{\text{нагревателя}}$ (см. график на рисунке 2.2). Степень черноты в уравнении радиационного теплообмена определяется как 0.75 для кирпичных стенок и 0.3-0.83 для металлических поверхностей. Граничное условие для температуры для поверхностей "газ-лодочка" и "газ-укладка таблеток" определяется условием сопряженного теплообмена (равенство температур газа и твердого тела совместно с равенством тепловых потоков).

Плотность таблетки в процессе спекания предлагается определять, используя подход на основе главной кривой спекания [16].

При этом история спекания представляется в виде одной т.н. главной переменной, комбинирующей время и температуру спекания. Данный подход был впервые предложен Су и Джонсоном [17]. В своей работе Су и Джонсон обосновывают подход тем, что геометрические параметры микроструктуры при спекании (при одинаковом виде порошка и процессах, предшествующих спеканию) часто являются функциями только плотности. Главная кривая спекания может быть использована для описания спекания, в котором ведущую роль играют процессы объемной или граничной диффузии (что справедливо для диоксида урана).

Следует отметить, что главная кривая спекания будет неизменной только при одном и том же типе порошка и процессе его подготовки, включая прессование. Главная переменная спекания определяется как

$$\Theta = \int \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) dt ,$$

где: T – температура, К;

Q – энергия активации, кДж/моль;

R – универсальная газовая постоянная; t – время, с.

В работе [18] данный подход распространяется на случай энергии активации, зависящей от температуры, что позволяет единообразно моделировать процессы спекания, в которых разные стадии определяются различными физическими механизмами.

По нескольким экспериментам (обычно используется спекание при постоянной скорости нагрева) находится зависимость

$$D = D(\Theta),$$

которая в дальнейшем может использоваться для предсказания плотности при использовании любой истории нагрева таблетки.

3.3. Теплофизические свойства диоксида урана

Так как в процессе спекания таблеток в широком диапазоне изменяется их температура (от 20°C до 1750°C) и пористость (от 0.5 до 0.03), то необходимо учитывать изменение их теплофизических свойств.

В работе [19] исследована зависимость теплопроводности диоксида урана в диапазоне температур до 2000°C (см. рисунок 2.4, чистому диоксиду урана соответствует график СИ-0).

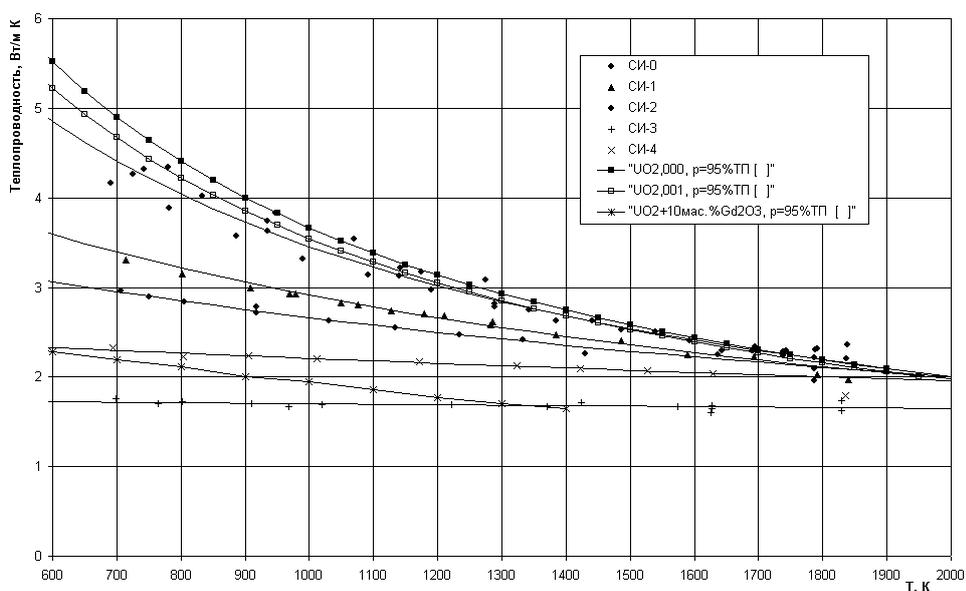


Рисунок 2.4 – Температурные зависимости теплопроводности образцов, приведенной к 95 % теоретической плотности (ТП)

Также в этой работе приводится аналитическая зависимость термического сопротивления от температуры вида:

$$R = \frac{1}{\lambda} = A + BT,$$

где: λ – теплопроводность;

A – тепловое сопротивление, обусловленное рассеянием фононов статическими дефектами кристаллической решетки;

$B \cdot T$ – тепловое сопротивление, обусловленное фонон-фононным рассеянием, или тепловое сопротивление самой решетки.

Значения коэффициентов A и B приведены в таблице 6.1

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов

Коэффициент	Источник							
	МАТПРО [6]	Баранов [7]	Hirai [8]	Андрианов [5]				
				СИ-0	СИ-1	СИ-2	СИ-3	СИ-4
$B \cdot 10^{-4} (\text{м} \cdot \text{Вт})$	2,290	2,273	2,113	2,086	1,619	1,232	0,189	0,580
$A (\text{м} \cdot \text{К}/\text{Вт})$	0,044	0,055	0,309	0,081	0,181	0,252	0,586	0,395

В работе [20] приводятся данные о теплопроводности оксида урана различного стехиометрического состава в диапазоне температур 370-970 °С.

В работе [21] представлен обзор опубликованных данных по теплоемкости, теплопроводности, коэффициенту теплового расширения диоксида урана.

В документе международного агентства по атомной энергии [23] приведены сводные данные по теплофизическим свойствам диоксида урана и даны рекомендуемые аналитические зависимости для расчета этих характеристик в зависимости от температуры.

В работе [22] приводится следующая рекомендуемая формула определения теплопроводности λ диоксида урана с плотностью 95% ТП (см. рисунок 3.5 и таблицу 3.2):

$$\lambda = \frac{100}{7.5408 + 17.692 t + 3.6142 t^2} + \frac{6400}{t^{5/2}} \exp\left(\frac{-16.35}{t}\right),$$

где: $t = T/1000$, T – температура в К.

Для определения теплопроводности для других значений плотности может использоваться формула Максвелла-Эукина [19]

$$\lambda_p = \lambda_0 \left(\frac{1-p}{1+\beta p} \right),$$

где: λ_p – теплопроводность диоксида урана с пористостью p ;

λ_0 – теплопроводность диоксида урана с теоретической плотностью (с нулевой пористостью);

p – пористость;

β – коэффициент, равный 0.5 для p менее 10 % и 0.7 для p более 10 %.

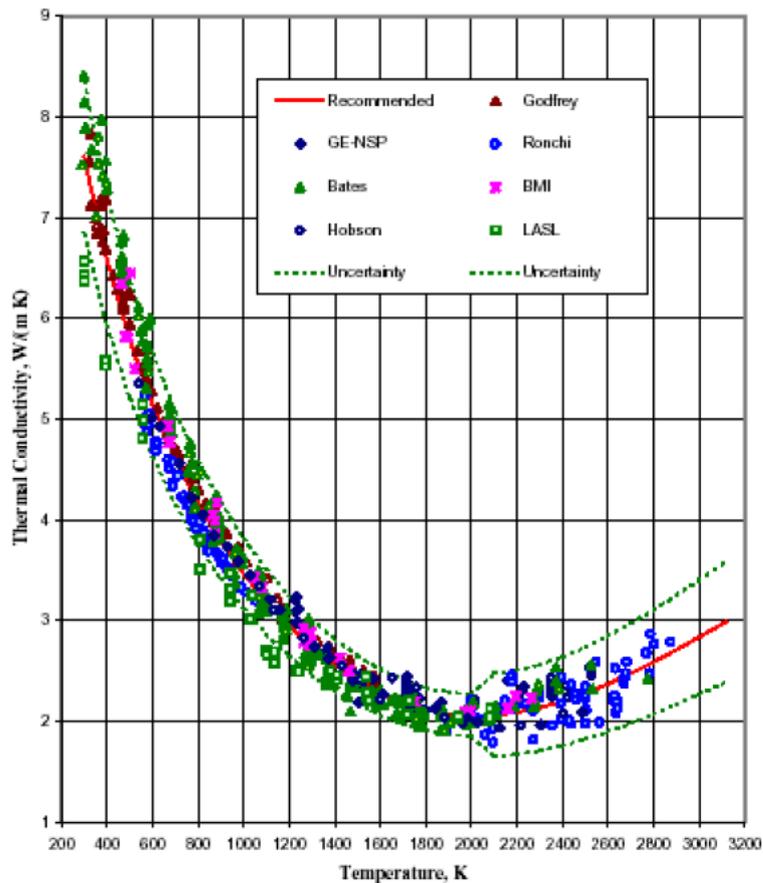


Рисунок 3.5 – Зависимость теплопроводности диоксида урана с плотностью 95% ТП от температуры. Красная линия – рекомендованное значение, пунктирные зеленые линии – интервал неопределенности, различные значки – экспериментальные данные

3.4. Экспериментальные данные о процессе спекания

При описании процесса спекания таблеток диоксида урана обычно рассматривают три стадии, представляющие собой образование перешейков между частицами, уменьшение открытой пористости и последующее уплотнение закрытых пор. Первая стадия спекания происходит быстро и может наблюдаться уже при 600°C. Последняя стадия – спекание закрытых пор, все еще остающихся на границах зерен идет значительно медленнее и требует температур более 1500°C. Промежуточная стадия спекания характеризуется наличием взаимосвязанной системы пор сложной геометрической формы. Кинетика спекания в большей степени зависит от начальной плотности, полученной при прессовании.

Таблетки с начальной плотностью меньше приблизительно на 50 % от теоретической плотности спекаются со значительной долей внутриверенных пор. Наоборот, для таблеток с начальной плотностью больше приблизительно на 50% микроструктура после спекания состоит в основном из межзеренных пор в тройных точках [24].

На разных стадиях спекания действуют различные механизмы переноса вещества, но во многих случаях различные механизмы действуют и одновременно. Однако те или иные механизмы спекания в определенные периоды становятся ведущими, но границы их действия заранее установить не представляется возможным. Например, переход от открытой пористости к закрытой пористости, в случае спекания некоторых оксидов при определенном размере зерен с определенным зерновым составом, происходит в интервале 75-85 % относительной плотности, а для других условий уже при 90-95 %.

Поэтому в большинстве случаев нельзя вывести уравнение кинетики на основе какого-либо одного (даже ведущего) механизма переноса вещества, которое могло бы описывать процесс в максимально возможном диапазоне усадки.

Предложено множество уравнений кинетики изотермического спекания, но наибольшее распространение получила зависимость вида [25]

$$\Delta l / l = k\tau^n,$$

где: l – линейный размер образца;

τ – время.

Показатель n по многим представлениям определяет ведущий механизм спекания – это так называемый "экспоненциальный метод определения механизма усадки". Прочно вошло в практику, что при $n = 0.5$ спекание определяется диффузионным механизмом; $n=3$ соответствует граничной диффузии и т.п.

Усадку высокоогнеупорных оксидов и соединений при твердофазном спекании в период от начала спекания (т.е. с учетом усадки за период нагрева) описывают следующим уравнением

$$\Delta l / l = m + n\sqrt{\tau},$$

где: m – коэффициент, представляющий собой значение усадки к моменту изотермической выдержки;

n – коэффициент, характеризующий скорость изотермической усадки.

Кажущаяся энергия активации изотермического спекания E_{cn} определяется по уравнению Аррениуса $v = Ae^{-E_{cn}/RT}$, где v – скорость спекания, $v = \Delta l / l$.

Логарифмический вид этого уравнения $\ln v = (-E_{cn} / R)T^{-1} + \ln A$ позволяет аналитически определить E_{cn} . Для этого сначала логарифмический вид уравнения Аррениуса дифференцируют по температуре $d(\ln v) = (E_{cn} / R)(dT / T^2)$, а затем интегрируют в пределах от T_1 до T_2 :

$$\int_{T_1}^{T_2} d(\ln v) = \frac{E_{cn}}{R} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T^2}, \quad \ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right) = \frac{E_{cn}}{R} \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2},$$

откуда

$$E_{cn} \approx 2.3R \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \lg \left(\frac{v_2}{v_1} \right),$$

где: v_1, v_2 – скорости спекания при температурах T_1 и T_2 .

Практически для вычисления энергии активации спекания определяют скорость спекания как минимум при двух температурах. По полученным данным строят график в координатах $\lg v - 1/T$. В соответствии с логарифмическим видом уравнения Аррениуса получается прямая линия. Угол наклона прямой определяют из графика. Тангенс угла наклона $tg\alpha = E_{cn} / R$, а $E_{cn} = Rtg\alpha$.

3.5. Теплофизические свойства водорода

Теплопроводность водорода, как и других газов, можно определить по формуле [26]:

$$\lambda = \frac{i}{3\pi^{3/2}} \frac{k}{d^2} \sqrt{\frac{RT}{M}},$$

где: T – температура, К;

i – сумма поступательных и вращательных степеней свободы молекулы;

M – молярная масса газа;

$R = 8.31$ Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная;

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

d – эффективный диаметр молекул.

Таким образом, теплопроводность водорода пропорциональна корню из температуры:

$$\lambda = C\sqrt{T},$$

где: $C = 0.0105$ Вт/(м·К^{3/2}).

Зависимость приведена на рисунке 3.6.

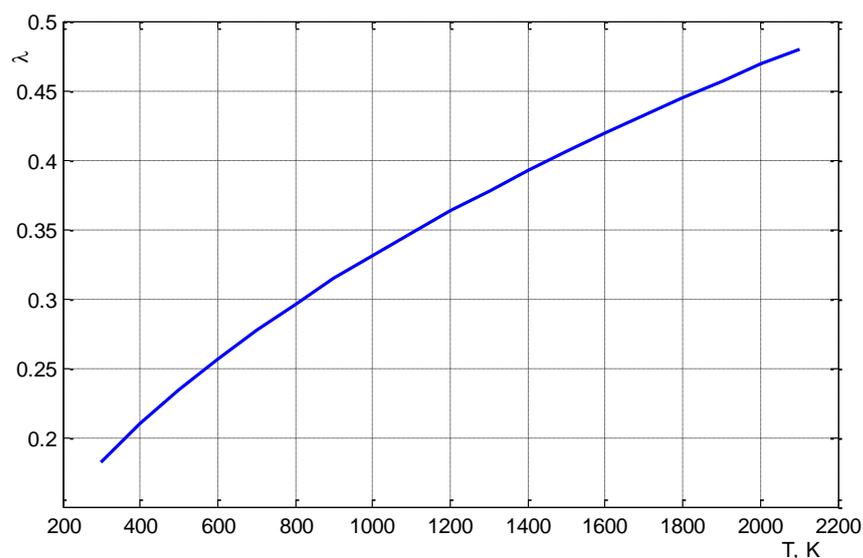


Рисунок 3.6 – Зависимость теплопроводности водорода от температуры

4. Инженерная модель спекания применительно к многозонным печам

В данном разделе описана инженерная модель спекания топливных таблеток. Инженерная модель строится на основе разработанной ранее полной математической модели процесса тепломассообмена топливной таблетки при произвольном расположении в лодочке при спекании, основанной на методе конечных объемов.

Недостатками полной модели является необходимость использования для расчета коммерческого пакета ANSYS, а также высокие требования к вычислительным ресурсам, что обуславливает длительное время расчета на персональных компьютерах.

Основной целью инженерной модели является достаточно точное моделирование процесса спекания топливных таблеток в промышленных печах с разным количеством и типом зон нагрева, причем программа, реализующая численные расчеты должна быть нетребовательной к вычислительным ресурсам и стабильно выполняться на средних по параметрам персональных компьютерах.

4.1. Описание математической модели укладки таблеток

Для проведения расчетов с минимальным использованием вычислительных ресурсов проводится расчет только одной лодочки с таблетками. Наличие окружающей лодочку газовой среды и излучения от нагревателей печи учитывается в виде граничных условий конвективного и радиационного теплообмена на гранях лодочки. Учет движения лодочки внутри печи в процессе спекания моделируется изменяющимися со временем параметрами этих граничных условий.

Для проведения расчетов с минимальным использованием вычислительных ресурсов укладка таблеток в лодочке при моделировании заменяется сплошной средой с некоторыми эффективными характеристиками.

Таким образом, физическая модель, используемая для инженерной модели процесса спекания, представляет собой параллелепипед (имеющий размеры, совпадающие с габаритами укладки таблеток в лодочке) из некоторого материала с эффективными теплофизическими параметрами. Такими параметрами являются плотность, теплопроводность и удельная теплоемкость. По рассчитанной к текущему моменту истории изменения температуры укладки определяется плотность таблеток с использованием подхода на основе главной кривой спекания. Все описанные выше параметры изменяются в зависимости от времени нахождения лодочки в печи и от геометрического положения в укладке.

Эффективная теплопроводность укладки зависит от теплопроводности таблеток (которая, в свою очередь, зависит от их текущей плотности и температуры), от теплопроводности среды (зависит от температуры) и от геометрии укладки (зависит от текущей плотности таблеток).

Эффективная плотность укладки зависит от текущей плотности таблеток и от плотности среды (зависит от температуры).

Эффективная удельная теплоемкость укладки зависит от текущей удельной теплоемкости таблеток (зависит от их плотности и температуры) и от удельной теплоемкости среды (зависит от температуры).

Блок-схема алгоритма, реализующего описанную выше математическую инженерную модель спекания, приведена на рисунке 4.1

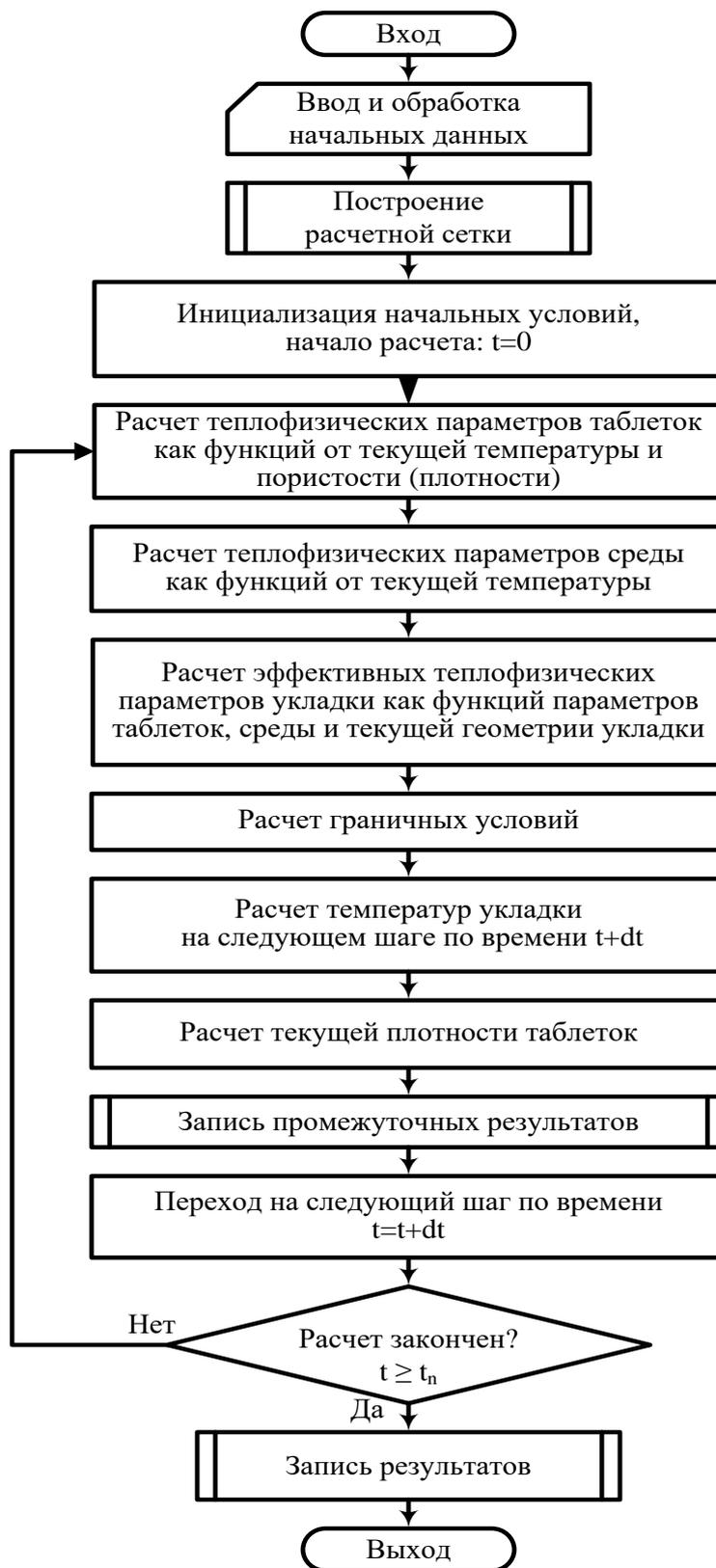


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма расчета

4.2. Определение эффективных термодинамических характеристик укладки таблеток

Для проведения расчетов с минимальным использованием вычислительных ресурсов укладка таблеток в лодочке при моделировании заменяется сплошной средой с некоторыми эффективными характеристиками. В случае расчета нестационарного температурного поля необходимо знать эффективные теплопроводность, удельную теплоемкость и плотность. Эффективные характеристики будут зависеть как от характеристик таблеток и среды (водорода), так и от геометрии их расположения в лодочке.

Теплофизические характеристики таблеток из диоксида урана зависят от температуры и текущей плотности (степени спекания). Теплофизические характеристики водорода зависят от температуры. Геометрия расположения таблеток в лодочке зависит от степени спекания таблеток, от начальной геометрии укладки, а также от случайных факторов.

Исходя из описанных выше зависимостей, эффективные параметры укладки также должны быть функцией всех этих факторов. Так как каждый из параметров (геометрия, температура и степень спекания таблеток) может изменяться независимо от других и принимать разные значения в различных местах лодочки, то точные зависимости эффективных параметров будут очень сложными и неприемлемыми для использования в инженерной модели.

Для получения инженерных зависимостей, которые будет возможно применять в расчете, предлагается следующее упрощение, целью которого является по возможности независимый учет указанных факторов: при анализе геометрии укладки таблеток в лодочке считаем, что все таблетки имеют в один момент времени одну и ту же степень спекания. Это предположение позволяет в каждый конкретный момент времени связать с текущей средней по укладке плотностью значения эффективных параметров, относящиеся к предварительно посчитанной геометрии укладки.

Таким образом, для известной геометрии укладки остается определить эффективные теплопроводность, удельную теплоемкость и плотность в зависимости от температуры.

4.3. Геометрическая модель укладки таблеток

Рассматривается задача об определении геометрии укладки таблеток в лодочке в процессе спекания.

Основным предположением является то, что первоначальная укладка имеет регулярную форму с чередующимися по направлению рядами таблеток (рисунок 4.2). Начальные геометрические характеристики таблеток имеют значения: диаметр 9.4 мм, высота 13.5 мм. Плотность исходной таблетки при этом составляет 5.5 г/см³.

В процессе спекания увеличение плотности материала таблеток приводит к изменению их геометрических размеров, что, в свою очередь, влияет на геометрию и характер укладки в целом.

Постепенное уменьшение высоты и диаметра таблеток ведет к трансформации укладки от «структурированной» к «произвольной». Данная трансформация прослеживается на рисунках 4.2-4.6, где показан процесс оседания укладки таблеток.

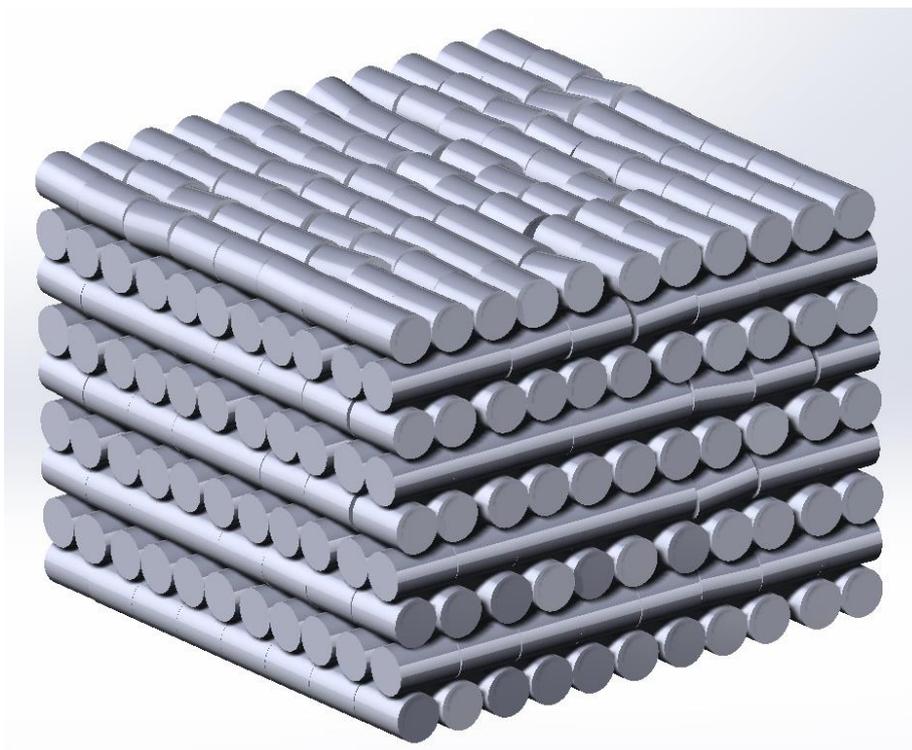


Рисунок 4.2 – Укладка таблеток с плотностью 5.5 г/см^3 (сырые таблетки)

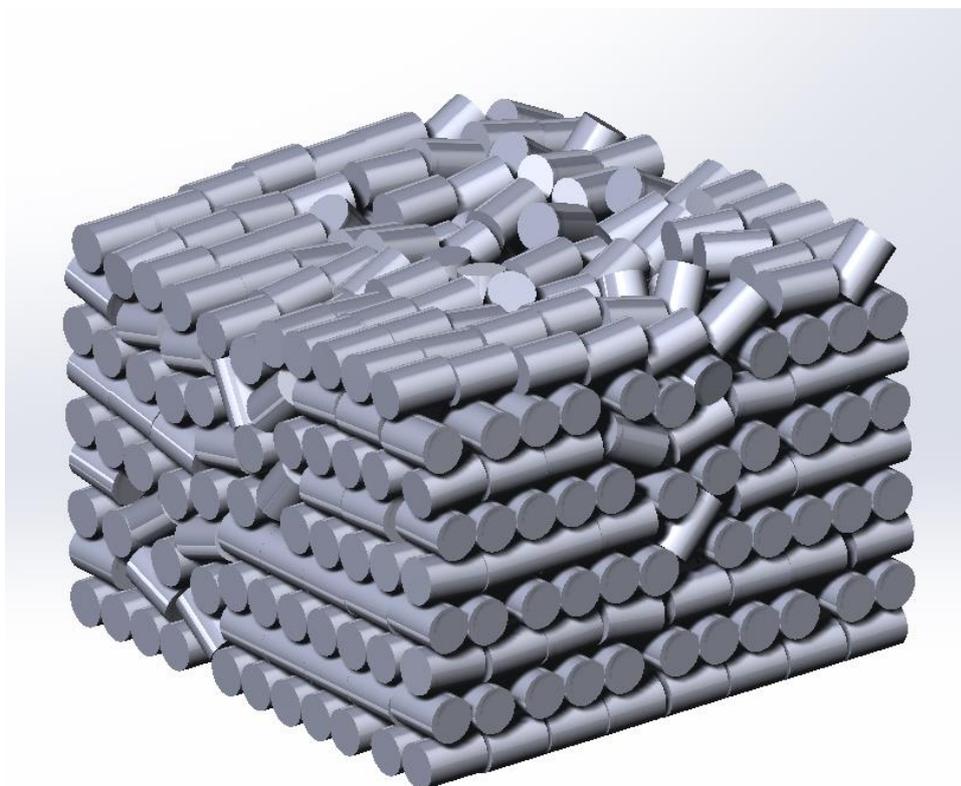


Рисунок 4.3 – Укладка таблеток с плотностью 6.75 г/см^3
(частично спеченные таблетки)

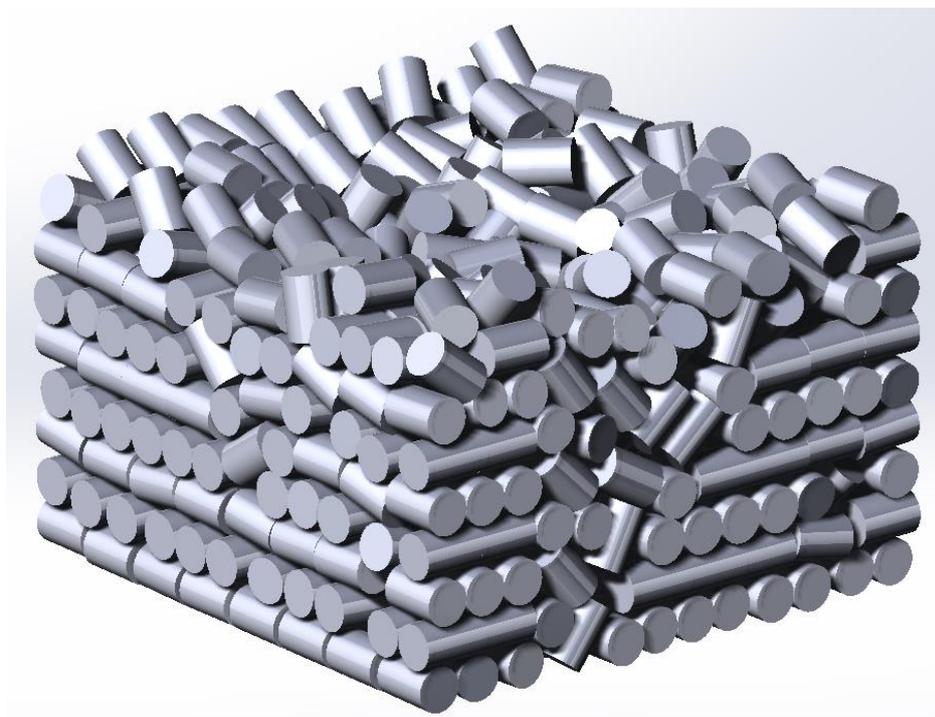


Рисунок 4.4 – Укладка таблеток с плотностью 8 г/см^3
(частично спеченные таблетки)

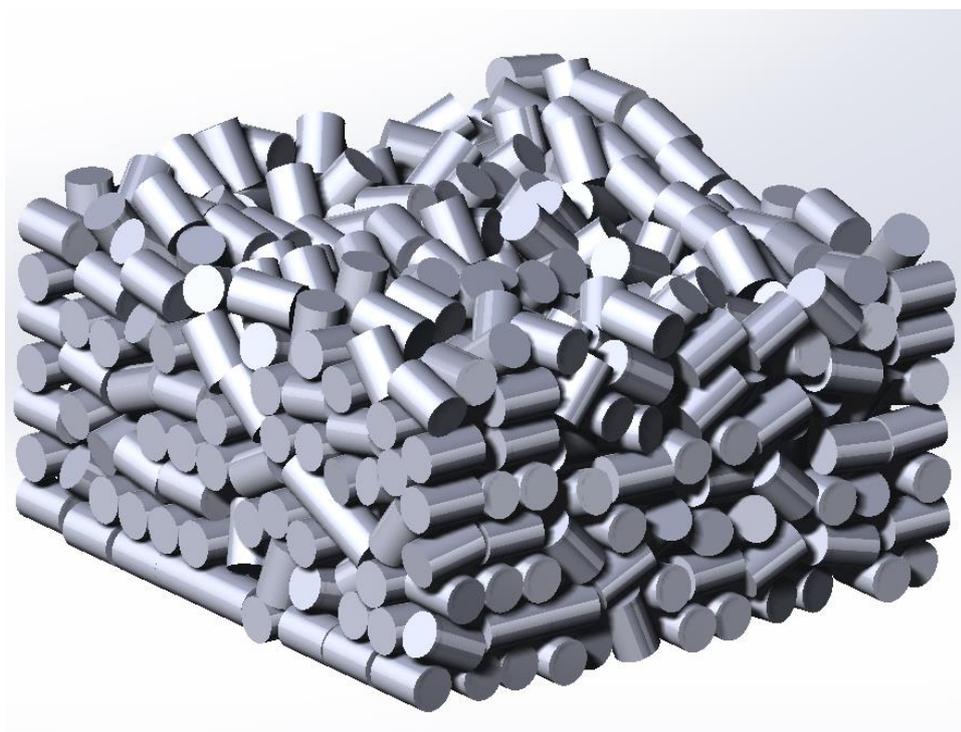


Рисунок 4.5 – Укладка таблеток с плотностью 9.25 г/см^3
(частично спеченные таблетки)

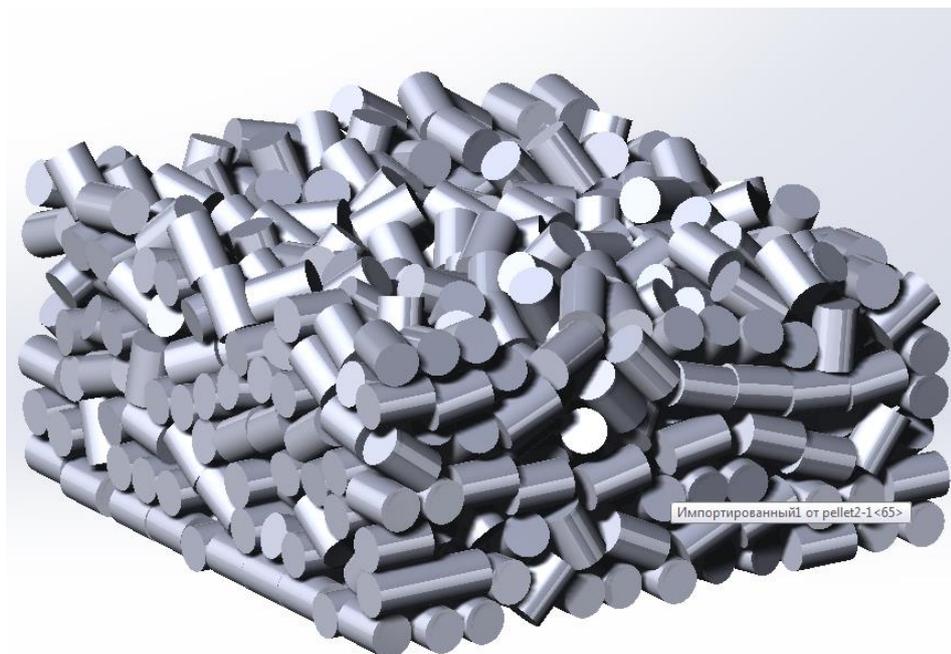


Рисунок 4.6 – Укладка таблеток с плотностью $10,5 \text{ г/см}^3$
(спеченные таблетки)

Решение данной задачи было осуществлено с использованием программного комплекса трехмерного моделирования SolidWorks. Данная CAD-система обладает необходимыми средствами для решения геометрической задачи определения взаимного положения множества тел друг относительно друга в условиях внешнего воздействия (наличие силы тяжести). Точность расчета позволяет в дальнейшем построить конечно-объемную модель как самих таблеток, находящихся в укладке (рисунок 4.7), так и газовой среды, в которой находятся данные таблетки (рисунок 4.8)

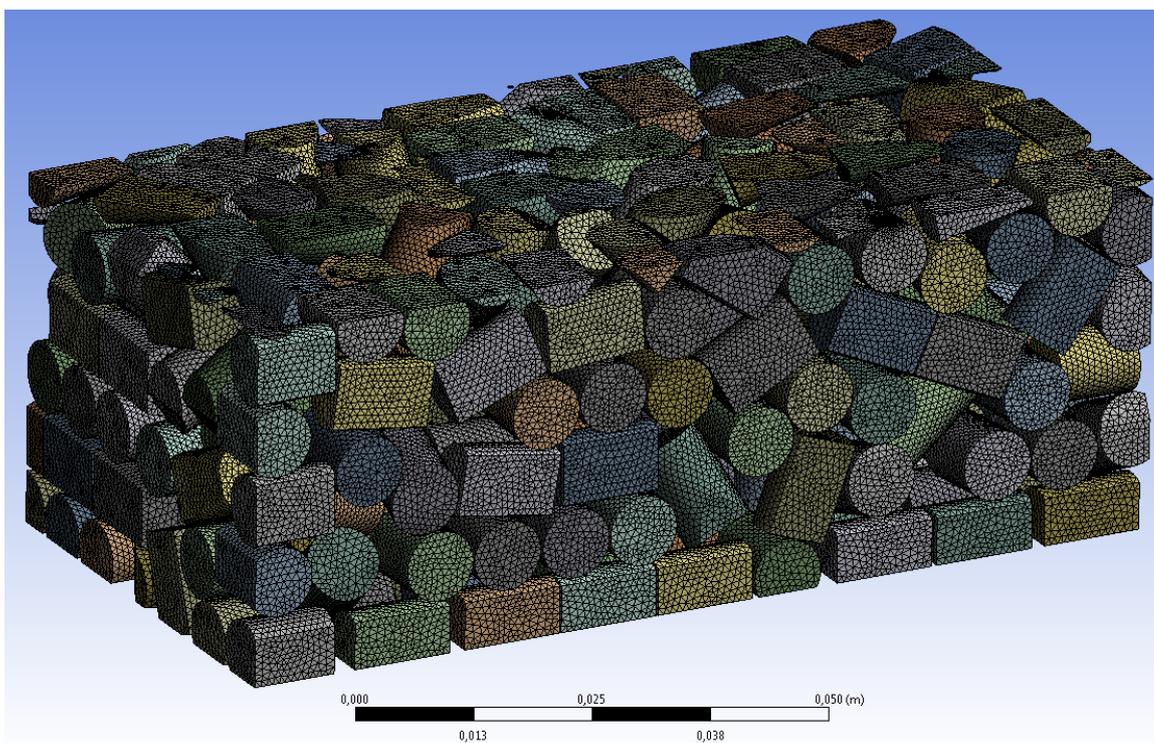


Рисунок 4.7 – Конечно-объемная модель части области с находящимися в ней таблетками

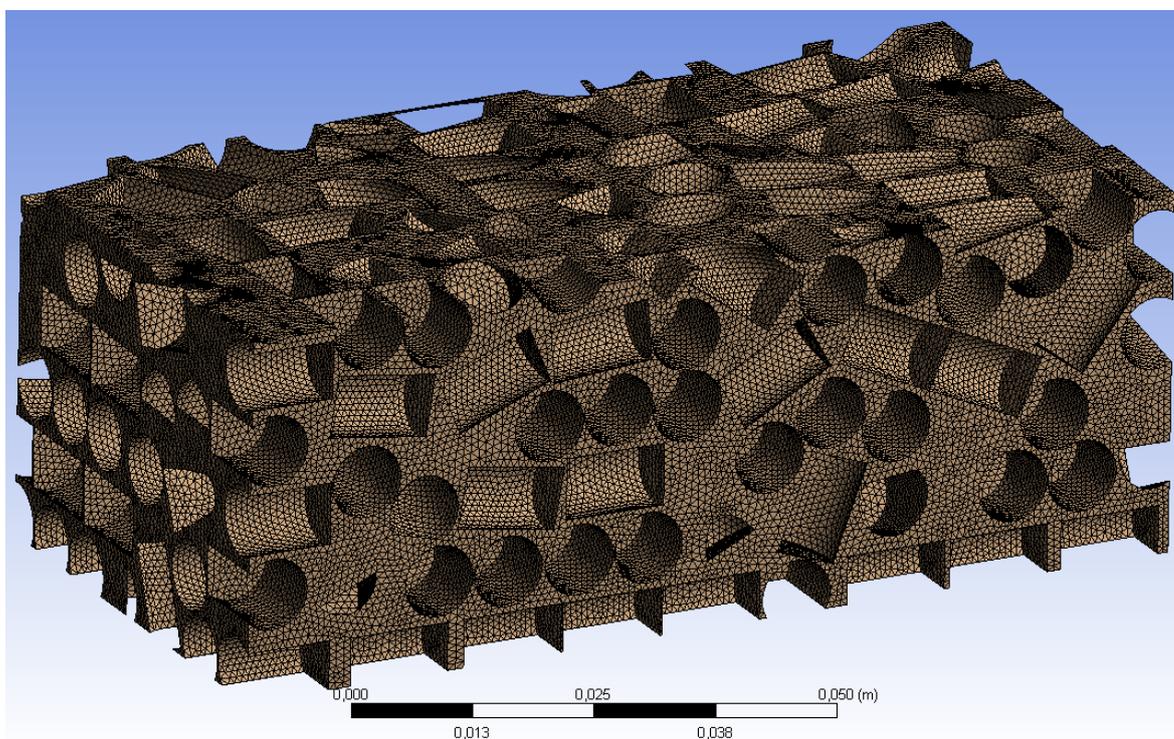


Рисунок 4.8 – Конечно-объемная модель части "межтаблеточной" области

Таким образом, полученная комплексная модель укладки таблеток и т.н. "межтаблеточной" газовой среды позволяет при помощи компьютерного моделирования определять эффективные теплофизические параметры укладки в целом на различных этапах процесса спекания.

4.4. Программная реализация инженерной модели

Программная реализация инженерной модели спекания имеет модульную архитектуру (рисунок 4.9). Графический интерфейс, основное расчетное ядро и вспомогательные модули отделены друг от друга, что позволяет вносить изменения и коррективы, проводить обновления одних частей модели, не затрагивая другие.

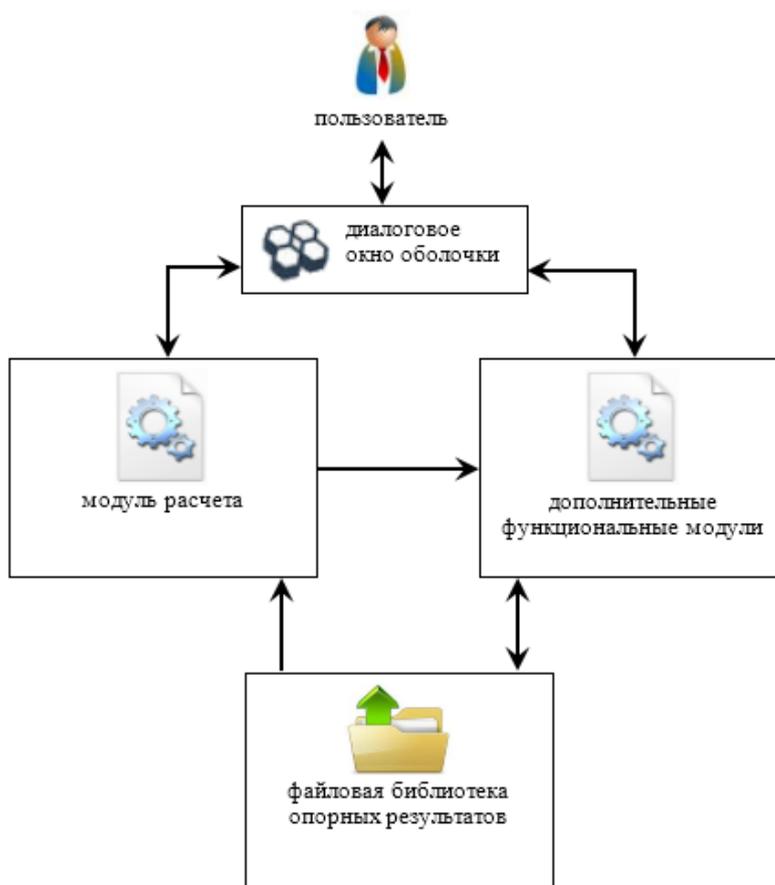


Рисунок 4.9 – Архитектура инженерной модели спекания.

Общий вид интерфейса пользователя приведен на рисунке 4.10. Интерфейс включает в себя главное меню и набор вкладок: «База данных», «Параметры расчета», «Сводка», «Графики», «Трехмерные результаты».

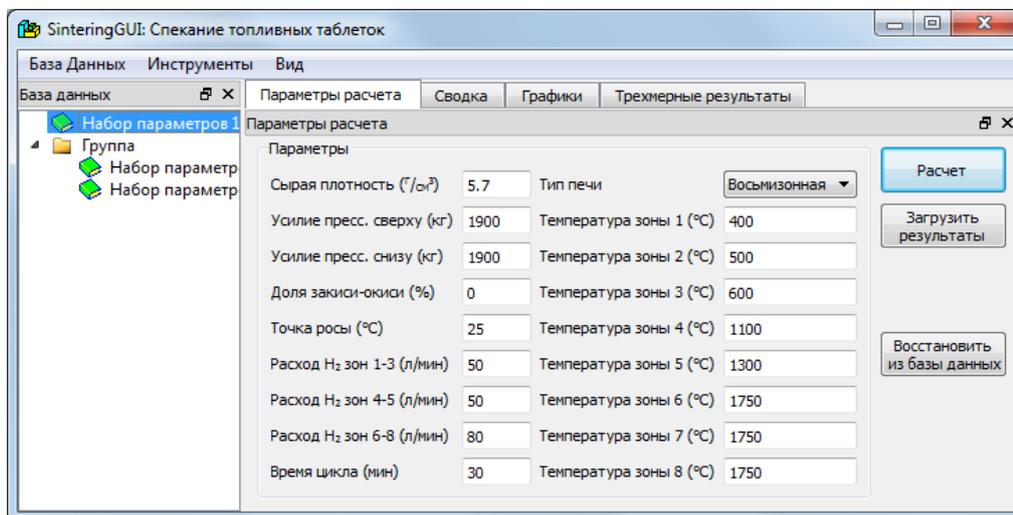


Рисунок 4.10 – Общий вид интерфейса пользователя

Вкладка «База данных» предназначена для работы с информацией, содержащейся в базе данных. База данных содержит данные о различных вариантах исходных данных для расчета. База данных представляет собой иерархическую структуру, с возможностью группировки вариантов расчета. Для переноса данных с одного компьютера на другой можно использовать команды главного меню

Вкладка «Параметры расчета» предназначена для задания исходных данных расчета. Редактируются исходные данные для текущего набора параметров, выбранного во вкладке «База данных».

Вкладка «Сводка» содержит основную информацию о проведенном расчете.

Вкладка «Графики» позволяет анализировать изменение результатов во времени (рисунок 4.11).

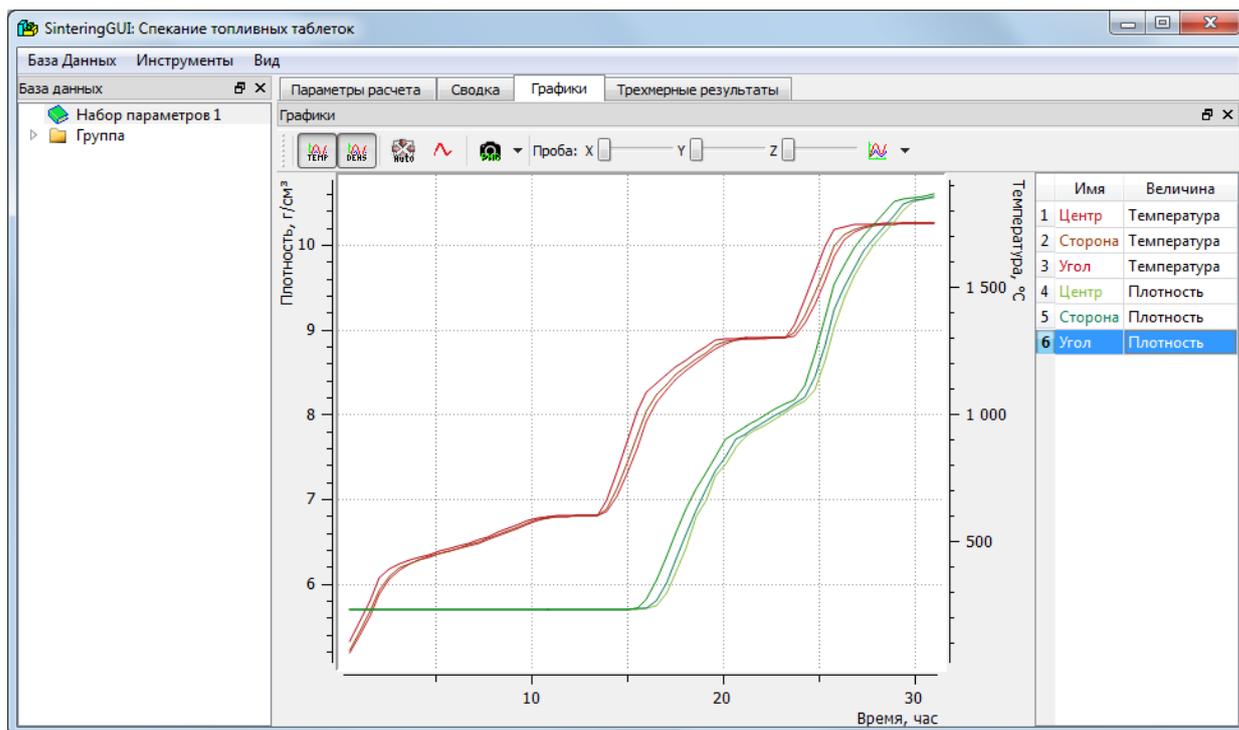


Рисунок 4.11 – Вкладка «Графики»

Вкладка «Трёхмерные результаты» (рисунок 4.12) позволяет анализировать распределение результатов расчета в пространстве (в различных областях лодочки). Элементы управления позволяют выбрать величину и момент времени для отображения, отобразить текущее положение лодочки в печи, сохранить текущее изображение в файл и т.д [27].

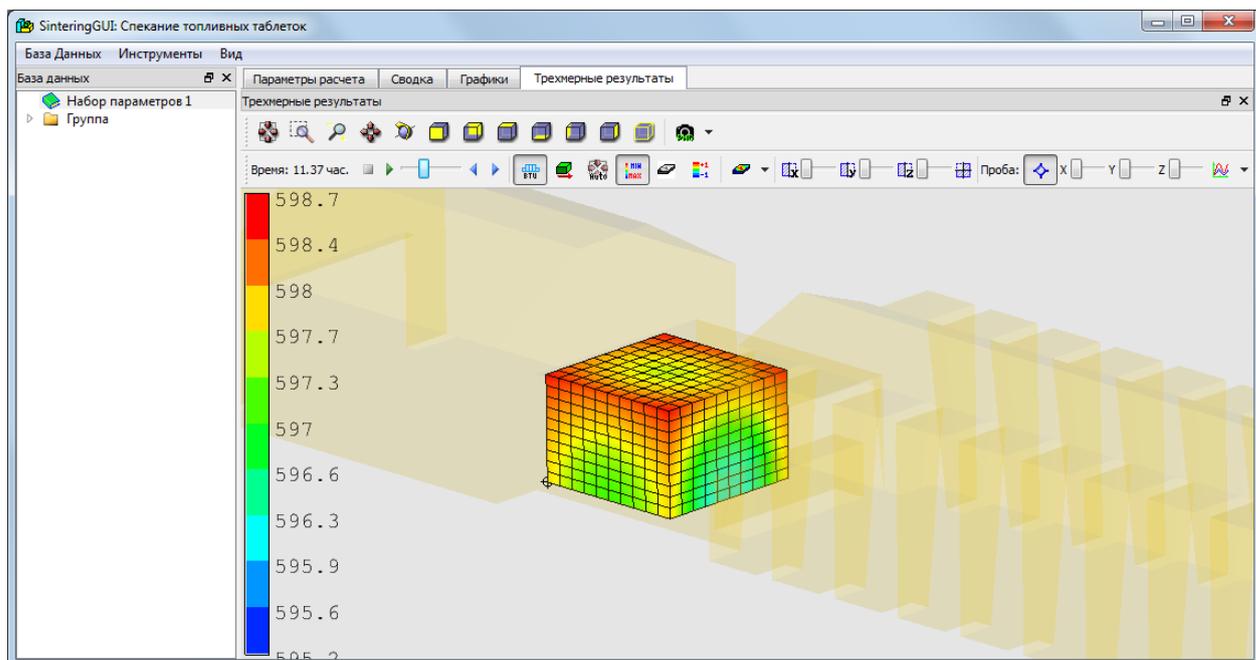


Рисунок 4.12 – Вкладка «Трехмерные результаты»

5. Верификация используемых в расчете моделей конечно-объемной модели спекания

5.1. Верификация инженерной модели спекания

В разделе представлены результаты расчетов с использованием инженерной модели спекания, позволяющей на персональном компьютере со следующими характеристиками: 6-ти ядерный процессор Intel Core i7-3930k 3.2 ГГц, 64 Гб ОЗУ, за 1-2 минуты (в зависимости от желаемой точности). Необходимо отметить, что расчет с использованием полной модели на высокопроизводительном кластере (Сервер Supermicro: десять 8-ми ядерных процессоров Intel Xeon E7-8870 2.4 ГГц, 512 Гб ОЗУ) занимает не менее 5 часов.

Сравнение полной модели и инженерного приближения представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнение моделей

Вар- т	ρ_{\min} Г/см ³		ρ_{\max} Г/см ³		Ошибка, %
	Расчет по инженерной модели	Расчет по полной модели	Расчет по инженерной модели	Расчет по полной модели	
2.1	10.53	10.53	10.54	10.57	0.14
2.2	10.45	10.44	10.51	10.53	0.14
3.1	10.43	10.42	10.48	10.52	0.24
3.2	10.35	10.35	10.40	10.51	0.53
4.1	10.43	10.45	10.49	10.52	0.24
4.2	10.38	10.38	10.43	10.52	0.43
5.1	10.51	10.51	10.52	10.53	0.05
5.2	10.42	10.43	10.47	10.52	0.29
5.3	10.46	10.48	10.51	10.53	0.19

5.2. Верификация конечно-объемной модели спекания

Для наглядности результаты расчета сведены в таблицу 5.1, где указаны максимальные и минимальные значения плотности таблеток при различных условиях их нахождения в печи. Под различными условиями понимается разное время спекания, различный температурный режим, разное содержание ЗОУ в сырой таблетке. В таблице 5.2 для каждого из вариантов расчетов приведены распределения температур по зонам печи.

Таблица 5.2 – Результаты расчета

Вар-т	% ЗОУ	ρ , г/см ³ сырой таблетки	ρ_{\min} , г/см ³		ρ_{\max} , г/см ³		Ошибка, %	Время нахождения в печи (час.мин)
			эксперт	расчет	эксперт	расчет		
1.1	10	–	10.550	10.300	10.610	10.460	1.89	19.15
1.2	10	–	10.510	10.470	10.560	10.540	0.28	21.49
2.1	12	5.76	10.430	10.530	10.530	10.570	0.67	22.49
2.2	12	5.74	10.480	10.440	10.520	10.530	0.24	20.23
3.1	12	5.75	10.440	10.420	10.480	10.520	0.29	19.52
3.2	12	5.76	10.440	10.350	10.510	10.510	0.43	18.22
4.1	12	5.76	10.330	10.450	10.460	10.520	0.87	20.01
4.2	12	5.75	10.460	10.380	10.520	10.520	0.38	18.59
5.1	12	5.76	10.507	10.510	10.576	10.530	0.23	21.40
5.2	12	5.75	10.483	10.430	10.544	10.520	0.37	19.42
5.3	13	5.75	10.507	10.480	10.575	10.530	0.34	17.32

Основными результатами проведенных расчетов являются "максимальные" и "минимальные" значения плотности спекаемых таблеток.

Из результатов видно, что качественно и в определенной степени количественно результаты согласуются с результатами эксперимента. При этом для более детального сравнения было бы желательно получить экспериментальное распределение по плотностям таблеток в зависимости от положения их в лодочке.

Данные, представленные в этом разделе будут использованы для сравнения с результатами, полученными при помощи инженерной модели спекания [27].

Сравнение полной модели и инженерного приближения представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Сравнение моделей

Вар- т	ρ_{\min} г/см ³		ρ_{\max} г/см ³		Ошибка, %
	Расчет по инженерной модели	Расчет по полной модели	Расчет по инженерной модели	Расчет по полной модели	
2.1	10.53	10.53	10.54	10.57	0.14
2.2	10.45	10.44	10.51	10.53	0.14
3.1	10.43	10.42	10.48	10.52	0.24
3.2	10.35	10.35	10.40	10.51	0.53
4.1	10.43	10.45	10.49	10.52	0.24
4.2	10.38	10.38	10.43	10.52	0.43
5.1	10.51	10.51	10.52	10.53	0.05
5.2	10.42	10.43	10.47	10.52	0.29
5.3	10.46	10.48	10.51	10.53	0.19

6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данной работе моделируется процесс спекания топливной таблетки из диоксида урана в высоко температурных печах. В ходе разработки модели, возможно предугадать состояние таблетки во время и после спекания, что позволит, в разработке новых аппаратов и улучшения технологии в целом.

Для эффективного использования научного потенциала научно-исследовательской работы (НИР) необходимо прилагать усилия не только к непосредственно её разработке, но и к проведению её анализа с точки зрения экономических требований.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» части выпускной квалификационной работы рассмотрены следующие вопросы:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно – исследовательской работы;
- расчет бюджета научно – технического исследования.

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

6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Целевой рынок. Госкорпорация «Росатом», промышленные предприятия по получению ядерного топлива, предприятия по производству ТВЭЛов.

6.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [28].

SWOT – анализ состоит из трех этапов. В первом этапе мы анализируем сильные и слабые стороны исследовательской работы (внутренняя среда), а так же возможности и угрозы (внешняя среда). Описание выполняется с помощью факторов, не имеющих количественной оценки (таблица А1, Приложение А).

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа построили интерактивную матрицу проекта (таблица 6.1). Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 6.1 – интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта.		С1.	С2.	С3.
	В1.	+	+	+
	В2.	+	+	+
Угрозы проекта.	У1.	0	0	+
	У2.	+	0	+
Слабые стороны проекта				
Возможности проекта.		Сл1.	Сл2.	
	В1	0	+	
	В2.	+	+	
Угрозы проекта.	У1.	-	-	
	У2.	-	-	

Третий этап заключается в составлении итоговой матрицы SWOT – анализа (таблица А2, Приложение А). Она заполняется, исходя из анализа таблицы 6.1.

6.2 Планирование научно-исследовательской работы

6.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления. Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок составления этапов и работ приведен в таблице А3 (Приложение А).

6.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости работ $t_{ож}$ используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{мини} + 2t_{макси}}{5}, \quad (6.1)$$

где $t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{мини}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{макси}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{ч_i}, \quad (6.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел [28].

6.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Показатель технической готовности темы характеризует отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период дипломного проектирования составляет примерно 6 месяцев, включая производственную практику, и дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (6.3)$$

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})}, \quad (6.4)$$

Где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округлены до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{366}{366 - 119} \approx 1.48$$

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 6.2.

Календарный план-график в виде диаграммы Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится на основе данных из таблицы 6.2 разбивкой по дням (декадам, месяцам) за период времени дипломирования. Работы на графике выделены различным цветом (штриховкой) в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу. Календарный план – график в виде диаграммы Ганта приведен в таблице А4 (приложение А).

Таблица 6.2 – Временные показатели проведения научного исследования

Этап	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожг}$, чел-дни			
1	0,5	1,5	0.9	руководитель	0.9	1
2	1	2	1.4	дипломник	1.4	2
3	3,5	4,5	3.9	дипломник	3.9	6
4	0,5	1,5	0.9	дипломник	0.9	1
5	3	3.5	3.2	руководитель, дипломник	1.6	2
6	3	3.5	3.2		1.6	2
7	2.5	3	2.7		1.35	2
8	1.5	2	1.7	руководитель, дипломник	0.85	1
9	2	2.5	2.2		1.1	2
10	4	5.5	4.6	дипломник	4.6	7
11	2.5	3.5	2.9	руководитель, дипломник	1.45	2
12	4.5	6.5	5.3	дипломник	5.3	8
13	3.5	5	4.1	дипломник	4.1	6
Итого:			37		29.05	42

6.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Целью планирования бюджета для проведения НТИ является экономически обоснованное определение величины затрат на ее выполнение.

В формировании НТИ включаются все затраты, связанные с ее выполнением независимо от источника финансирования. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

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

- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.
- Рассчитаем те, которые имеются в нашей работе.

6.3.1 Расчет материальных затрат

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

К категории материалов относят:

- электроэнергия на технологические цели.

Работа проводилась 14 дней по 8 часов (112), мощность установки 0.45 кВт/час и расход охлаждающей воды (не менее) 1,8 м³/час

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об}, \quad (6.5)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (2,7 руб за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

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

$$C_{эл} = 2,7 \cdot 0,45 \cdot 112 = 4320 \text{ руб.}$$

6.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада.

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

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (6.10)$$

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 6.2.);

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (6.11)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб. (в качестве месячного оклада дипломника выступает стипендия, которая составляет 6900 руб. и 22300 руб. для доцента, кандидата наук);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 6.3).

$$Z_{\text{дн}} = \frac{28990 \cdot 10,4}{199} = 1515,06 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 1515,06 \cdot 8,85 = 13408,28 \text{ руб.}$$

Заработная плата дипломника за время выполнения НИР составит:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{8900 \cdot 10,4}{172} = 538,14 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 538,14 \cdot 28,15 = 15148,64 \text{ руб.}$$

Баланс рабочего времени представлен в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Дипломник
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней -выходные и праздничные дни	119	119
Потери рабочего времени		
-отпуск	48	74
-невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	172

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ТС}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (6.12)$$

где $Z_{\text{ТС}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб. (для доцента $Z_{\text{ТС}}$ составляет 22300 руб.);

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Зтс, руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	22300	1,3	28990	1746,91	8,85	13408,28
Дипломник	6900	1,3	8900	417,21	28,15	15148,64
Итого $Z_{осн}$						28556,92

6.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Дипломная работа выполнялась с 14.05.2016 по 19.06.2016. С 01.01.2010 страховые взносы осуществляются в государственные внебюджетные фонды. На 2015 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году вводится пониженная ставка – 27,1 [29].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (6.14)$$

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

Таким образом, выплаты в страховые фонды составят:

$$Z_{внеб} = 0,271 \cdot 13408,28 = 3634 \text{ руб.}$$

6.3.5 Накладные расходы

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

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр} = k_{нр} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (6.15)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

$$Z_{накл} = 0,3 \cdot 13408,28 = 4022 \text{ руб.}$$

6.3.6 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями.

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками.

Так как при проведении научно-технических исследований все подготовительно-отладочные работы, технологические операции и расчеты были осуществлены на базе кафедры № 23 ФТИ ТПУ с имеющимся оборудованием и расходными материалами только научным руководителем и дипломником без привлечения сторонних организаций, то в данном случае можно говорить, что контрагентные расходы отсутствуют.

6.3.7. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью 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.

Так как при проведении научно-технических исследований все подготовительно-отладочные работы, технологические операции и расчеты были осуществлены на базе кафедры № 23 ФТИ ТПУ с имеющимся оборудованием и расходными материалами, то в данном случае можно говорить, что затраты на специальное оборудование для научных работ отсутствуют.

6.3.8 Расчет затрат на научные и производственные командировки

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных тарифов.

Так как при проведении НТИ не было научных и производственных командировок, то в данном случае можно говорить, что затраты на научные и производственные командировки отсутствуют.

6.3.9 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

На основании выше сказанного составим бюджет затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения, приведен в таблица 6.6.

Таблица 6.6. – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НИИ	4320	Пункт 4.3.1
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	28556,92	Пункт 4.3.2
3. Отчисления во внебюджетные фонды	3634	Пункт 4.3.4
4. Накладные расходы	4022	Пункт 4.3.5
5. Контрагентские расходы	0	Пункт 4.3.6
6. Затраты на специальное оборудование для научных работ	0	Пункт 4.3.7
7. Затраты на научные и производственные командировки	0	Пункт 4.3.8
8. Бюджет затрат НИИ	40533	Сумма ст. 1–8

Для выполнения данных исследований были задействованы два исполнителя: научный исполнитель и дипломник. Из вышеизложенной калькуляции видно, что для реализации данного проекта необходимо 42 календарных дня, суммарный бюджет научно-технического исследования составил 40533 рублей.

7. Социальная ответственность

7.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

В данной части рассматривается работа инженера, которая связана с моделированием на компьютере.

Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1-Анализ вредных и опасных факторов

Наименование видов работ	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с ПК	–	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)	–	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»

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

На инженера, работа которого связана с моделированием на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические:

температура и влажность воздуха;

шум;

статическое электричество;

электромагнитное поле;

освещённость;

наличие излучения;

- психофизиологические

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

7.2. Требования к ПЭВМ и организация работы

7.2.1. Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

7.2.2. 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 7.1:

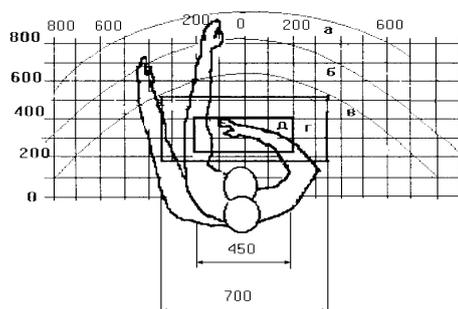


Рисунок 7.1 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

- 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.

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, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

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.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

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.

7.2.3. Условия безопасной работы

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

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [30] и приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.2 Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

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

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.

В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека - не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция.

Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

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. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля.

Согласно [31] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне 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);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час.

По нормам [31] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более $7,7 \cdot 10^{-4}$ А/кг, что соответствует эквивалентной дозе, равной 100 мкР/час.

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

7.3. Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35°C), наличии

токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;

при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);

при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

7.4. Пожарная безопасность

Согласно [32], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

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

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

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

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

К режимным мероприятиям относятся, 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:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- 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 аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112.
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок.

- Отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа;
- Принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- Вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- Заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- Покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- Недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклучение в корпус токоведущих частей).

Действие электрического тока на организм человека

- **Термическое действие тока** проявляется в ожогах участков тела, нагрева до высокой температуры кровеносных сосудов, нервов, сердца, мозга и др., находящихся на пути электрического тока, что приводит к серьезным функциональным расстройствам;
- **Механическое действие тока** выражается в разрыве мышечной ткани, стенок кровеносных сосудов и др., в результате взрывоподобного образования пара от перегретой током тканевой жидкости и крови, а также в результате электродинамического эффекта;

- **Электролитическое действие тока** выражается в разложении органической жидкости, в том числе и крови электрическим током, что сопровождается изменениями их физико-химического состава;
- **Биологическое действие тока** проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей организма и в нарушении внутренних биологических процессов, связанных с жизненными функциями организма. Так, например, при прохождении тока через мышцы, возбуждение, обусловленное раздражающим действием тока, проявляется в виде непроизвольного сокращения мышц. Внешний ток может подавить биотоки или нарушить их нормальное воздействие на ткани и органы, вызвав тем самым расстройства в работе сердца, мозга, легких и др. вплоть до гибели человека.

Выводы

Главной целью настоящей работы являлась разработка инженерной модели спекания применительно к многозонным печам и проведение многовариантных вычислительных экспериментов.

В отчете сформулированы физическая и математическая задачи, описывающие физические процессы, происходящие в укладке таблеток при спекании в высокотемпературных печах ВТУ.

В работе решены следующие задачи:

- разработана инженерная модель спекания топливных таблеток применительно к промышленным печам с разным количеством и типом зон нагрева путем использования упрощенных моделей сосредоточенных параметров;
- проведены многовариантные вычислительные модельные эксперименты на массиве экспериментальных данных спекания таблеток типа ВВЭР в промышленных восьми- и шестизонных печах;
- сравнены результаты, полученные с помощью инженерной модели спекания, использующей метод сосредоточенных узлов, и модели спекания, использующей метод конечных объемов;
- определена точности расчета и оценена сокращение времени расчета при использовании инженерной модели.

Заключение

В результате выполнения работы определены временные зависимости свойств топливных таблеток при спекании (распределение температуры в таблетке, плотность и пористость, фазовые превращения в таблетке, рост зерен), а также зависимости параметров печи при спекании (расход и распределение скоростей водорода, температурное поле в разных зонах по зоне, лодочке с таблетками). Разработана и верифицирована инженерная модель процесса спекания топливных таблеток в промышленных печах с разным количеством и типом зон нагрева. Использование разработанной модели спекания позволяет провести экспресс-прогнозирование свойств спеченных таблеток и режимов спекания, что позволяет снизить временные и материальные затраты при изготовлении топливных таблеток.

На основе математической формулировки разработаны модели различной сложности, например, полная конечно-объемная модель, требующая значительных вычислительных ресурсов и позволяющая получать детальную информацию в произвольный момент времени. Также, приведено описание инженерной модели для описания процесса спекания топливных таблеток в промышленных печах с разным количеством и типом зон нагрева.

Описаны результаты, полученные при проведении расчетов методом конечных объемов с использованием полной математической модели. Проведено сравнение результатов для разных математических моделей. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными показывает удовлетворительное согласование.

Полученная математическая модель позволяет предсказывать характеристики спекаемых таблеток с высокой степенью точности, что подтверждается сравнением результатов.

Список использованных источников

1. *Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Т.В.* Процессы порошковой металлургии, В 2-х томах. Том второй: Формование и спекание. Учебник для вузов. – М.: МИСиС, 2002. –320 с.
2. *Котельников Р.Б., Башлыков С.Н., Каптанов А.И., Меньшикова Т.С.* Высокотемпературное ядерное топливо. – М.: Атомиздат, 1986. – 386 с.
3. *Жданович Г.М.* Теория прессования металлических порошков. – М.: Металлургия, 1969. – 264 с.
4. *Бальшин М.Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. –.: Металлургия, 1972. – 336 с.
5. *Коллиер Дж., Хьюитт Дж.* Введение в ядерную энергетику. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 255с.
6. Патент Великобритании № 2056155, G21C3/62, 1981г.
7. Патент ЕПВ № 0277708, G21C3/62, 1988г.
8. Патент США № 3692887, G21C3/62, 1987г.
9. Патент ЕПВ № 0377077, G21C3/62, 1990г.
10. *Андреев Э.К., Бочаров А.С., Иванов А.В., Либенсон Г.А., Лисин А.Н., Маловик В.В.* Оценка эффективности технологий топливных таблеток из порошка UO_2 с использованием модели динамики «активных» пор // Изд. Вузов. Цветная металлургия. – 2002. – №4. – С.47-50.
11. *Андреев Э.И., Бочаров А.С., Иванов А.В., Либенсон Г.А., Лисин А.Н., Маловик В.В.* Математическая модель оптимизации технологии топливных таблеток из порошка диоксида урана // Изд. Вузов. Цветная металлургия. – 2003. – №1. – С.48-52.
12. *Васильев В.В., Курилов П.Г., Лигачев А.Е., Мишин Б.С.* Порошковая металлургия и композиционные материалы. – М.: МАТИ, 1983. – 62 с.
13. *Григорьев А.К., Рудской А.И.* Энергетические методы решения технологических задач пластичности пористых материалов // Порошковая металлургия. – 1988. – №5. – С.6-10.

14. *Майоров А.А., Браверман И.Б.* Технология получения керамической двуокиси урана. - М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
15. *НИИ ПММ ТГУ; рук. Бутов В. Г.; исполн.: Солоненко В. А. и др* Разработка математической модели процесса тепломассообмена топливной таблетки при произвольном расположении в лодочке при спекании: отчет о НИР (итоговый) / НИИ ПММ ТГУ; рук. Бутов В. Г.; исполн.: Солоненко В. А. и др. – Томск, 2013. – 68 с. – Инв. № 2013.102.13.
16. Fang Zh. Z. (Ed.) *Sintering of Advanced Materials.* Woodhead Publishing Limited, 2010, 483 p.
17. H. Su and D. L. Johnson, *Master Sintering Curve: A Practical Approach to Sintering, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 79, Issue 12, 1996, Pp. 3211-3217.*
18. Kiani, S., Pan, J. and Yeomans, J. A., *A New Scheme of Finding the Master Sintering Curve. J. Am. Ceram. Soc., Vol. 89, Issue 11, 2006, pp. 3393–3396.*
19. *А.Н. Андрианов, В.Г. Баранов, Ю.Г. Годин, В.Б. Круглов, А.В. Тенишев.* Теплопроводность диоксида урана, содержащего твердые имитаторы продуктов деления // Сборник докладов седьмой Российской конференции по реакторному материаловедению г. Димитровград, 8-12 сентября 2003 г.
20. *Goldsmith, L. A. and Douglas, J. A. M.,* Measurement of the thermal conductivity of uranium dioxide at 670- 1270 K. *Journal of Nuclear Materials,* 1973, 47, 31-42
21. *J. K. Fink.* Thermophysical properties of uranium dioxide // *Journal of Nuclear Materials* Volume 279, Issue 1, March 2000, Pages 1-18.
- 22.. Thermophysical properties database of materials for light water reactors and heavy water reactors. IAEA, Vienna, 2006 IAEA-TECDOC-1496.
- 23.. MATPRO. A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behaviour. TREE-NUREG-1005, E.G. and G. Idano. Inc. 1989.

24. *W. Beere*. The sintering and morphology of interconnected porosity in UO₂ powder compacts, *J. Mater. Sci.*, 8, 1973, p.1717.
25. *Жиганов А.Н., Гузеев В.В., Андреев Г.Г.* Технология диоксида урана, как керамического ядерного топлива, Томск, 2003.
26. *С.В. Грищенко, А.А. Повзнер*. Исследование теплопроводности газов. Определение эффективного диаметра и длины свободного пробега молекул: методические указания к лабораторной работе № 3 /. Екатеринбург: УрФУ, 2010, 23с.
27. *D. Lahiri, S.V. Ramana Rao, G.V.S. Hemantha Rao, R.K. Srivastava*. Study on sintering kinetics and activation energy of UO₂ pellets using three different methods // *Journal of Nuclear Materials*. Vol. 357, Issues 1–3, 2006, Pp. 88–96.
28. *И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Креницына*; Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие // . – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
29. Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования»
30. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
31. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность..
32. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность.

Приложение А

Таблица А1 – Матрица SWOT

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Имеется поддержка проекта Фондом содействия развитию малых предприятий в научно-технической сфере.	Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство промышленных установок под ключ.
С2. Экономичность проведения исследований. Компьютерное моделирование не требует специального дорогостоящего программного обеспечения.	Сл2. Сложное финансовое положение.
С3. Экологичность метода. При проведении исследований нет каких-либо отходов.	Сл3. Слабая информационная база в программирование.
С4. Более низкая стоимость получения результатов моделирования за счет использования собственного программного обеспечения.	
С5. Наличие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца в будущем.	
Возможности	Угрозы
В1. Создание востребованной инженерной модели.	У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства из-за малой известности метода и ограниченности дополнительных финансовых ресурсов на использование нового у организаций.
В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.	У2. Несвоевременное финансовое обеспечение.

Таблица А2 – SWOT–анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Имеется поддержка проекта Фондом содействия развитию малых предприятий в научно-технической сфере. С2. Экономичность проведения исследований. С3. Экологичность метода. При проведении исследований нет каких-либо отходов. С4. Более низкая стоимость получения результатов моделирования за счет использования собственного программного обеспечения. С5. Наличие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца в будущем.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство промышленных установок под ключ. Сл2. Сложное финансовое положение. Сл3. Слабая информационная база в программирование.</p>
<p>Возможности: В1. Создание востребованной инженерной модели. В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p>	<p>В1С1С2С3С4С5, В2С1С2С3С4С5. Из данной комбинации видим, что вышеперечисленные сильные стороны благотворно влияют на возможность создания рынка водородного топлива и появлению дополнительного спроса на системы хранения водорода.</p>	<p>В1Сл2, В2Сл1Сл2. Анализ показывает, что такие возможности как В1 и В2 положительно влияют на слабые стороны проекта, т.к создание рынка появление дополнительного спроса могут существенно улучшить сложное финансовое положение и повысить интерес компаний, оказывающих инжиниринговые услуги.</p>
<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Несвоевременное финансовое обеспечение</p>	<p>У1С1С3С5, У2С1С3С5. Проведя анализ сильных сторон и угроз, видно, что вышеуказанные сильные стороны проекта могут существенно понизить процент угроз исследования</p>	<p>-</p>

Таблица А3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Категория	Этап	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка ТЗ на ВКР	1	Составление и утверждение технического задания	руководитель
Выбор направления исследования	2	Изучение поставленных задач	дипломник
	3	Подбор и изучение научно-технической литературы	дипломник
	4	Календарное планирование работ по теме	дипломник
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Изучение рассматриваемого процесса спекания	руководитель, дипломник
	6	Разработка математической модели изучаемого процесса	дипломник
	7	Разработка компьютерной программ на основе разработанной математической модели	руководитель, дипломник
	8	Компьютерное моделирование изучаемого процесса	дипломник
Обобщение и оценка результатов	9	Анализ и обработка полученных результатов	дипломник
	10	Обсуждение результатов и их оценка	руководитель, дипломник
Оформление отчета ВКР	11	Оформление пояснительной записки и графических работ	дипломник
	12	Подготовка к защите темы	дипломник
	13	Репетиция защиты	дипломник

Таблица А4 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

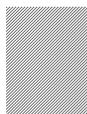
№ работ	Вид работ	Исполнители	Тк, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ							
				Май							
				2	3 - 4	5 - 10	11	12 - 14	15 - 17	18 - 20	
1	Составление и утверждение технического задания	руководитель	1								
2	Изучение поставленных задач	дипломник	2								
3	Подбор и изучение научно-технической литературы	дипломник	6								
4	Календарное планирование работ по теме	дипломник	1								
5	Изучение рассматриваемого процесса спекания	руководитель, дипломник	2								
6	Разработка математической модели изучаемого процесса	руководитель, дипломник	2								
7	Разработка компьютерной программ на основе разработанной математической модели	руководитель, дипломник	2								

Продолжение таблицы А4

№ работ	Вид работ	Исполнители	Тк, кал. дн.	Продолжительность выполнения ра				
				Май		Май	Май	Июнь
				21	22	23 - 29	30 - 31	1 - 8
8	Компьютерное моделирование изучаемого процесса	дипломник	1					
9	Анализ и обработка полученных результатов	дипломник	2					
10	Обсуждение результатов и их оценка	руководитель, дипломник	7					
11	Оформление пояснительной записки и графических работ	дипломник	2					
12	Подготовка к защите темы	дипломник	8					
13	Репетиция защиты	дипломник	6					



- руководитель



- ДИПЛОМНИК



- совместная работа