

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Моделирование теплопроводящих свойств композиционного материала
УДК 620.22-419.8:536.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Грибков Александр Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Бурков Михаил Владимирович	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Маланина Вероника Анатольевна	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Ваулина О.Ю.	к.т.н., доцент		

Планируемые результаты обучения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке (-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
ОПК(У)-2	Способен использовать в профессиональной деятельности знания о подходах и методах получения результатов в теоретических и экспериментальных исследованиях
ОПК(У)-3	Готов применять фундаментальные математические,

	естественнонаучные и общепрофессиональные знания в профессиональной деятельности
ОПК(У)-4	Способен сочетать теорию и практику для решения инженерных задач
ОПК(У)-5	Способен применять в практической деятельности принципы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской и расчетно-аналитической деятельности в области материаловедения и технологии материалов
ПК(У)-2	Способен осуществлять сбор данных, изучать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию по тематике исследования, разработке и использованию технической документации, основным нормативным документам по вопросам интеллектуальной собственности, подготовке документов к патентованию, оформлению ноу-хау
ПК(У)-3	Готов использовать методы моделирования при прогнозировании и оптимизации технологических процессов и свойств материалов, стандартизации и сертификации материалов и процессов
ПК(У)-4	Способен использовать в исследованиях и расчетах знания о методах исследования, анализа, диагностики и моделирования свойств веществ (материалов), физических и химических процессах, протекающих в материалах при их получении, обработке и модификации
ПК(У)-5	Готов выполнять комплексные исследования и испытания при изучении материалов и изделий, включая стандартные и сертификационные, процессов их производства, обработки и модификации
ПК(У)-6	Способен использовать на практике современные представления о влиянии микро - и нано- структуры на свойства материалов, их взаимодействии с окружающей средой, полями, частицами и излучениями
ПК(У)-7	Способен выбирать и применять соответствующие методы моделирования физических, химических и технологических процессов
ПК(У)-8	Готов исполнять основные требования делопроизводства применительно к записям и протоколам; оформлять проектную и

	рабочую техническую документацию в соответствии с нормативными документами
ПК(У)-9	Готов участвовать в разработке технологических процессов производства и обработки покрытий, материалов и изделий из них, систем управления технологическими процессами

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ О.Ю.Ваулина
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4Б71	Грибков Александр Сергеевич

Тема работы:

Моделирование теплопроводящих свойств композиционного материала	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № _____ от _____

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Персональный компьютер, программное обеспечение ABAQUS FEA, MATLAB, Notepad++, Microsoft Excel</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Изучение конечно–элементного анализа, показателей теплопроводности и аналитических моделей теплопроводности композиционных материалов;</p> <p>Изучение возможностей ABAQUS FEA через графический интерфейс и программирование на языке Python;</p> <p>Моделирование опыта по измерению теплопроводности согласно утвержденному стандарту;</p> <p>Корреляция результатов моделирования с результатами аналитических вычислений и натурных экспериментов.</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Зависимость коэффициента теплопроводности от содержания наполнителя</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
<i>Финансовый менеджмент...</i>	<i>В.А. Маланина, доцент, ТПУ, отделение СГН</i>
<i>Социальная ответственность</i>	<i>М.С. Черемискина, ассистент, ТПУ, отделение ОТД</i>

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

--

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бурков Михаил Владимирович	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Грибков Александр Сергеевич		

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Уровень образования Бакалавриат
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2020 /2021 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
18.03.21	<i>Литературный обзор</i>	25
24.04.21	<i>Моделирование проводимого исследования</i>	35
25.05.21	<i>Анализ результатов</i>	20
4.05.21	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	10
7.05.21	<i>Социальная ответственность</i>	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Бурков Михаил Владимирович	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 80 страниц, 13 рисунков, 19 таблиц, 27 источников.

Ключевые слова: композиционный материал, теплопроводность, моделирование, ABAQUS FEA, ASTM, FEM.

Объектом исследования являются конечно–элементные модели композиционных материалов из терморезактивной эпоксидной смолы, армированной дисперсными наполнителями – частицами меди и углеродными микроволокнами.

Цель работы – разработка и верификация модели измерения теплопроводности полимерных композиционных материалов, армированных различными наполнителями.

В процессе исследования проводилось моделирование распространения теплового потока в образцах до установления стационарного состояния.

В результате исследования оценено влияние наполнителей на теплопроводность терморезактивной смолы.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: конструкция для проведения симуляций согласно ASTM C518–17, граничные условия при разработке моделей.

Степень внедрения: тестирование в лабораторных условиях.

Область применения: машиностроительное производство.

Экономическая эффективность/значимость работы: снижение производственных издержек при разработке новых материалов с заданными свойствами.

В будущем планируется переход к разработке углепластиков, армированных углеродными нанотрубками и другими компонентами, написание подпрограммы, учитывающей особенности взаимодействия матрицы с армирующим компонентом.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Композиционный материал – материал, состоящий из двух и более компонентов, разделенных четкой границей, и характеризующийся свойствами, не присущими ни одному из этих компонентов.

Скрипт (Script) – программный код, написанный с целью выполнения заложенной в него последовательности операций.

ВНИМ – страхование на случай временной нетрудоспособности или материнства.

ИФПМ СО РАН – Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

КМ – композиционный материал.

ЛМПКМ – лаборатория механики полимерных композиционных материалов.

ОКВЭД – общероссийский классификатор видов экономической деятельности.

ОМС – обязательное медицинское страхование.

ОПС – обязательное пенсионное страхование.

ПК – персональный компьютер.

ПО – программное обеспечение.

ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

ASTM – American Society for Testing and Materials

CMF – carbon microfibers

FEM – Finite Element Method.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	12
1 Литературный обзор.....	13
1.1 Метод конечных элементов.....	13
1.2 Теплопроводность. Основные понятия.....	14
1.3 Аналитические модели теплопроводности.....	16
1.4 ASTM C518–17	17
2 Объект и методы исследования	20
3 Результаты проведенного исследования.....	30
3.1 Эпоксидная смола	30
3.2 Эпоксидная смола, армированная частицами меди.....	31
3.3 Эпоксидная смола, армированная углеродными микроволокнами	35
Заключение	40
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	43
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	44
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	44
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений	44
4.1.3 SWOT–анализ	46
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	47
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	47
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	49
4.2.3 Разработка графика проведения исследования.....	49
4.3 Бюджет научно-исследовательского проекта	54
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-исследовательского проекта	54

4.3.2	Расчет амортизации оборудования.....	54
4.3.3	Основная заработная плата исполнителей НИП.....	55
4.3.4	Дополнительная заработная плата	56
4.3.5	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)..	57
4.3.6	Накладные расходы.....	57
4.3.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	58
4.4	Определение ресурсной, финансовой и экономической эффективности проекта	58
	Вывод.....	61
5	Социальная ответственность.....	64
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	65
5.1.1	Специальные правовые нормы трудового законодательства	65
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	65
5.2	Производственная безопасность.....	66
5.2.1	Анализ вредных и производственных факторов	67
5.3	Экологическая безопасность.....	73
5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	74
	Вывод.....	76
	Список использованных источников	77

Введение

XXI век – век композиционных материалов. Благодаря возможности контроля свойств при производстве композиты обладают повышенными механическими, термическими, электрическими и другими характеристиками.

Пластики, хоть и характеризуются как легкие, прочные и коррозионностойкие материалы, но имеют низкие показатели теплопроводности. Однако их применение в качестве матриц КМ, армированных дисперсными частицами проводящих материалов, позволяет решить проблему недостаточной теплопроводности, сохранив все преимущества данных полимерных материалов.

Кроме того, на сегодняшний день крайне актуально использование FEM, реализованного на базе ПО, в решении различных инженерных задач, поскольку квалифицированный специалист в области механики разных сред способствует экономической эффективности организации при разработке новых материалов.

Целью данной работы является разработка и верификация модели измерения теплопроводности полимерных композиционных материалов с помощью многоцелевого комплекса для решения инженерных задач – ABAQUS FEA.

1 Литературный обзор

1.1 Метод конечных элементов

FEM – численный метод, используемый для выполнения конечно–элементного анализа физических процессов. Суть анализа заключается в рассмотрении различных систем с помощью дифференциальных уравнений в частных производных через дискретизацию на элементы. На углах каждого элемента находятся узлы, которым и присваивается очередное дифференциальное уравнение. Для связи значений исследуемых величин между элементами и узлами используются функции интерполяции. Поскольку решение дифференциального уравнения сводится к интегралу, то разбиение системы на элементы (узлы) переводит ее в систему уравнений, которые могут быть решены с помощью матричной алгебры [1]. Для одного элемента справедливо:

$$(u(x))^{(n)} = f(x) \Rightarrow u(x) = \iiint \dots \int f(x)v(x) , \quad (1)$$

$$u(x) = \sum_{i=1}^{nep} N_i u_i , \quad (2)$$

где $(u(x))^{(n)}$ – n -ая производная неизвестной функции $u(x)$, описывающей некое физическое явление;

$f(x)$ – функция зависимости некой величины от $u(x)$;

$v(x)$ – пробная функция;

N_i – i -ая функция интерполяции;

u_i - неизвестная функция в i -том узле;

nep – количество узлов в элементе.

Подставив (2) в (1), получают матричную форму.

Пробные функции выбираются с целью удовлетворения заданным граничным условиям [2].

В связи со сложностью расчетов, включающих подбор пробных функций и решение уравнений в частных производных, в последнее время используют программное обеспечение, позволяющее с помощью графического интерфейса проводить конечно–элементный анализ.

1.2 Теплопроводность. Основные понятия

Тепловой поток на поверхности вещества – количество тепла, проходящее через поперечную площадку вещества, в единицу времени. Количественно может быть выражено как:

$$q = \frac{Q}{S \times t}, \quad (3)$$

где q – тепловой поток, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

Q – количество тепла, Дж;

S – поперечное сечение вещества, м^2 ;

t – длительность распространения теплового потока, с.

Удельная теплоемкость – количество тепла, необходимое для изменения температуры вещества массой 1 кг на 1 °С. Количественно может быть выражено как:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad (4)$$

где c – удельная теплоемкость вещества, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{°С}}$;

m – масса вещества, кг;

ΔT – разница между конечной и начальной температурами, °С.

Теплопроводность – способность материала проводить тепло.

Эмпирическая связь между скоростью проводимости материала и градиентом температуры описывается законом Фурье [3]:

$$q = -\lambda \nabla T, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^\circ\text{С}}$;

∇T – градиент температуры, $\frac{^\circ\text{С}}{\text{м}}$.

Соответственно, для однонаправленной проводимости в условиях стационарной теплопередачи:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}. \quad (6)$$

Поместим материал с длиной L в одном направлении в начало координатной оси Ox . Тогда при теплопередаче вдоль L граничные условия составят:

$$x = 0 \Rightarrow T = T_1, \quad (7)$$

$$x = L \Rightarrow T = T_2, \quad (8)$$

где T_1 – температура на поверхности тела со стороны теплового потока, $^\circ\text{С}$,

T_2 – температура на поверхности тела со стороны, противоположной тепловому потоку, $^\circ\text{С}$.

Разделяя переменные и подставляя пределы интегрирования, получим:

$$\int_0^L q dx = \int_{T_1}^{T_2} -\lambda dT \Rightarrow qL = \lambda(T_1 - T_2) \Rightarrow \lambda = \frac{qL}{T_1 - T_2}. \quad (9)$$

Контактная температуропроводность – свойство вещества, характеризующее его скорость распределения теплового потока при изменении температуры на 1°С . Количественно может быть выражено как [4]:

$$C = \frac{q}{T_1 - T_2}. \quad (10)$$

Вывести оптимальную контактную температуропроводность для разных материалов не представляется возможным, поскольку данный показатель зависит от множества факторов. В частности, практически невозможно вычислить контактную поверхность между контактирующими образцами,

поэтому, как правило, данную величину стараются не использовать при расчетах [5].

1.3 Аналитические модели теплопроводности

В первом приближении теплопроводность КМ описывается обратным правилом смесей (Series model), когда имеется однородный тепловой поток, а температурный градиент есть средневзвешенная сумма градиентов через матрицу и наполнитель. В этом случае справедлива формула [6]:

$$k_c = \left(\frac{1 - \varphi}{k_p} + \frac{\varphi}{k_f} \right)^{-1}, \quad (11)$$

где k_c – теплопроводность композита, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times ^\circ\text{C}}$;

φ – объемная доля наполнителя;

k_p – теплопроводность полимерной матрицы, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times ^\circ\text{C}}$;

k_f – теплопроводность наполнителя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times ^\circ\text{C}}$.

Данная модель применяется для дисперсно-упрочненных композитов, когда отсутствует просачивание матрицы в частицы наполнителя, имеет близкую сходимость с результатами эксперимента и является основой для других, скорректированных моделей, учитывающих особенности композиции.

Так, для КМ, армированного сферическими частицами, справедливо выражение Максвелла-Гарнетта [7]:

$$k_c = k_p \left(1 + \frac{3\varphi \left(\frac{k_f}{k_p} - 1 \right)}{2 + \frac{k_f}{k_p} - \varphi \left(\frac{k_f}{k_p} - 1 \right)} \right). \quad (12)$$

Если армирующие частицы имеют произвольную форму, то для расчета теплопроводности композита используется формула Фрике (Fricke's equation) как обобщение выражения Максвелла-Гарнетта [7]:

$$k_c = k_p \left(1 + \frac{n\varphi\left(\frac{k_f}{k_p} - 1\right)}{n - 1 + \frac{k_f}{k_p} - \varphi\left(\frac{k_f}{k_p} - 1\right)} \right), \quad (13)$$

$$n = \left(\frac{\beta \left(\frac{k_f}{k_p} - 1 \right)}{\left(\frac{k_f}{k_p} - 1 \right) - \beta} \right), \quad (14)$$

$$\beta = \frac{1}{3} \left(\frac{k_f}{k_p} - 1 \right) \left[\frac{2}{1 + L_{11} \left(\frac{k_f}{k_p} - 1 \right)} + \frac{1}{1 + L_{33} \left(\frac{k_f}{k_p} - 1 \right)} \right], \quad (15)$$

$$L_{11} = \frac{r^2}{2(r^2 - 1)} - \frac{r}{2(r^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} \cosh^{-1} r, \quad (16)$$

$$L_{33} = 1 - L_{11}, \quad (17)$$

$$r = \frac{size}{th}. \quad (18)$$

где L_{11} и L_{33} – геометрические факторы армирующего компонента;

r – коэффициент, учитывающий форму компонента;

$size$ – поперечный размер компонента, м;

th – длина компонента, м.

1.4 ASTM C518–17

Данный стандартизированный метод для измерения свойств термической передачи в устойчивом состоянии был выбран в качестве основы для разработки модели измерения теплопроводности. Для проведения измерений требуется наличие хотя бы одного образца (Specimen), датчика измерения теплового потока и температуры (Heat flux transducer), холодной плиты (Cold plate) и горячей плиты (Hot plate).

Данный стандарт достаточно универсален, поскольку не предъявляет строгих требований как к образцам, так и к самой конструкции. Изложено

несколько способов расположения для измерения теплопроводности. Было решено воспроизвести вариант с двумя образцами, плотно прилегающими друг к другу (рисунок 1) [8].

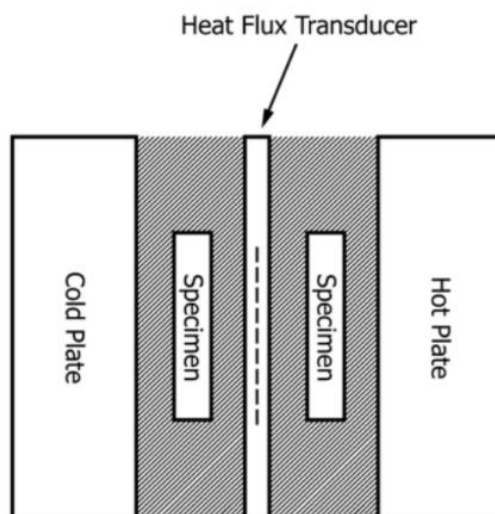


Рисунок 1 – Конструкция для проведения испытаний на определение теплопроводности с одним датчиком измерения теплового потока и двумя образцами

Таким образом, данная схема расположения ориентирована на измерение среднего теплового потока от двух образцов. Другими словами, для непосредственного измерения теплопроводности необходимо дождаться, когда температура между образцами и тепловой выровняются, то есть наступит тепловое равновесие. При этом температура плит должна поддерживаться постоянной на протяжении всего эксперимента. Также, если говорить о натуральных испытаниях, в случае тепловых характеристик есть нюанс касательно теплоизоляции. Об этом будет рассказано далее.

Теплопроводность в данном случае находится по последующей формуле [8]:

$$\lambda = \frac{(C_a + C_b)(L_a + L_b)}{2 \left(\frac{1}{\Delta T_{plates}} + \frac{1}{\Delta T_{plates}} \right) (\Delta T_a + \Delta T_b)}, \quad (19)$$

где C_a, C_b – контактная теплопроводность каждого из образцов, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{°C}}$;

L_a, L_b – толщина образцов вдоль теплового потока, м;

ΔT_{plates} – разница температур между горячей и холодной плитами соответственно, °C;

$\Delta T_a, \Delta T_b$ – разница температур между каждым из образцов, °C.

Подставляя в (19) формулу (10), получим:

$$\lambda = \frac{\left(\frac{q_a}{\Delta T_a} + \frac{q_b}{\Delta T_b} \right) (L_a + L_b)}{2 \left(\frac{1}{\Delta T_{plates}} + \frac{1}{\Delta T_{plates}} \right) (\Delta T_a + \Delta T_b)}, \quad (20)$$

где q_a, q_b – тепловые потоки каждого из образцов, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

2 Объект и методы исследования

С целью оценки влияния различных наполнителей на теплопроводность полимерных композитов на базе ABAQUS FEA были проведены симуляции испытаний согласно ASTM C518–17 для чистого материала, эпоксидной смолы, и двух дисперсно–армированных КМ, наполненных частицами меди и СМФ, соответственно.

Поскольку расчет композитов, армированных мелкогазмерными включениями, требует большой мощности вычислительной техники, все симуляции, кроме случая с неармированной смолой, проводились за отведенное время на ПК в ИФПМ СО РАН.

Для удобства в качестве твердотельной модели матрицы был выбран куб со ребром 5 мм для расчета чистой смолы и смолы, армированной медью, и 2.5 мм в случае углеродных микроволокон (рисунок 2).

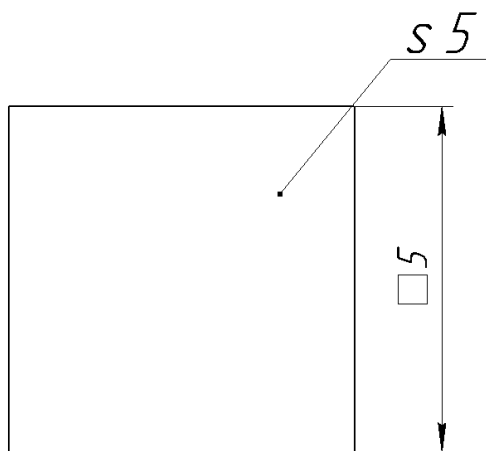
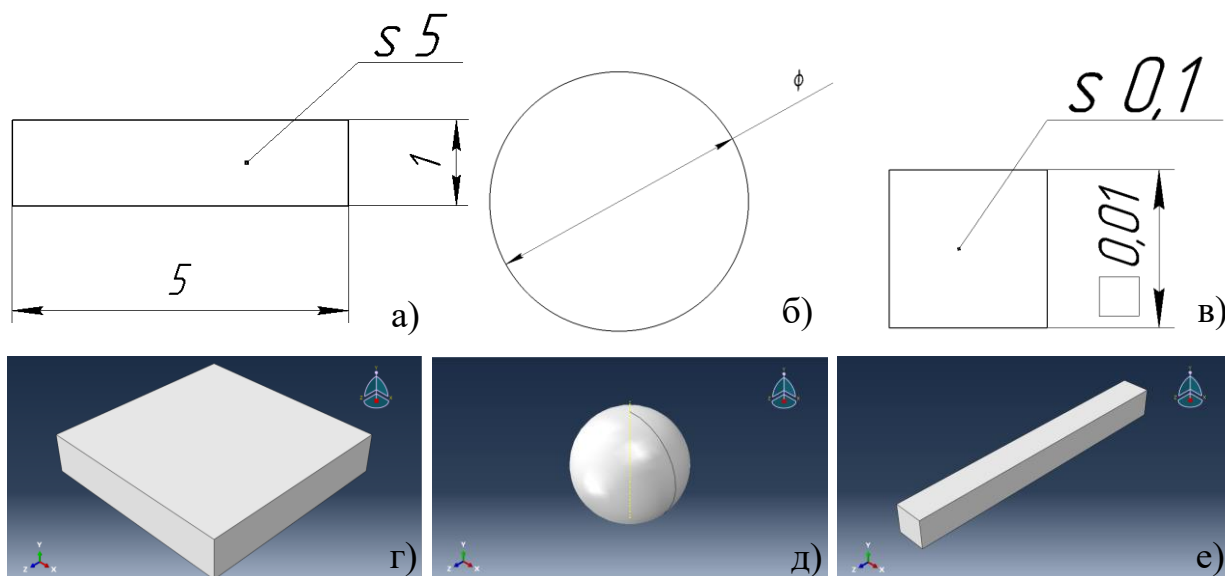


Рисунок 2 – Профиль матрицы

Также были созданы модели медного нагревателя, сферической частицы и микроволокна, выполняющих роль горячей (холодной) плиты и наполнителей, соответственно. Назначение нагревателя – накопление энергии тепла и передача

ее образцам в заданные промежутки времени, наполнителей (в рамках данной работы) – преимущественно увеличение теплопроводности (рисунок 3).

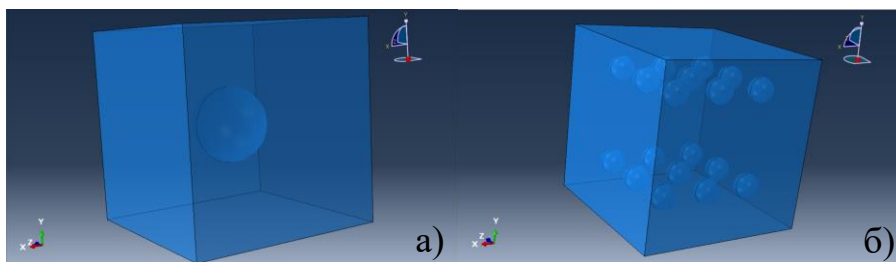


а) профиль нагревателя; б) профиль частицы произвольного диаметра; в) профиль микроволокна; г) модель нагревателя; д) модель частицы меди; е) модель микроволокна

Рисунок 3 – Профили и модели нагревателя и наполнителей

Стоит отметить, что истинная форма углеродных микроволокон – цилиндры с длиной много больше диаметра основания, однако для последующей дискретизации было решено несколько изменить форму для стабильной работы программного обеспечения.

Для оценки влияния меди на теплопроводность было спроектировано 2 варианта распределения частиц внутри матрицы (рисунок 4).



а) модель с одной сферой в центре; б) модель с 18 сферами
 Рисунок 4 – Варианты расположения наполнителя в матрице

Таким образом, изменяя радиус сфер при равных объемных долях для обоих вариантов, возможно оценить вклад наполнителя в интегральную теплопроводность за счет изменения объемной доли, его распределения в матрице и наличия прерывности в объеме.

Также следует оценить предельный размер частиц, выше которого теоретически проводить испытания невозможно.

В случае модели с одной сферой ее максимальный радиус составляет половину ребра куба. То есть верхний предел объемной доли составит (обозначим ребро куба за a):

$$\varphi_{Cu_{max}} = \frac{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{a}{2}\right)^3}{a^3} = \frac{\pi}{6} \approx 0.524. \quad (21)$$

Однако, смоделировать такой случай методом конечных элементов не представляется возможным, поскольку в данном случае имеются 4 точки, в окрестностях которых сгенерируются мелкие элементы для расчета всей модели, что вызовет нестабильность в расчетах. Опытным путем выяснилось, что в случае одной сферы в центре куба максимальная объемная доля составляет 45%. Данный вывод очень важен, поскольку поможет выяснить пределы расположения в случае с 18 частицами меди.

Определим эти пределы и минимальный размер частицы рассмотрев принципиальную схему расположения в проекции на одну из плоскостей (рисунок 5).

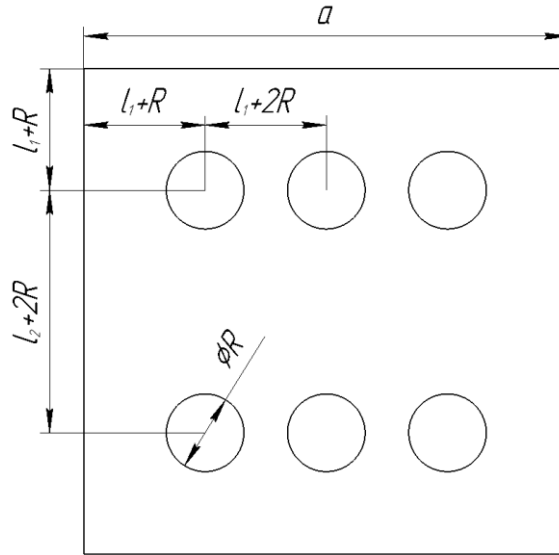


Рисунок 5 – Проекция расположения частиц в матрице

Составим систему уравнений, учитывающую зависимость радиуса частицы R и количества частиц N от расстояний l_1 и l_2 :

$$\varphi_{Cu} = \frac{4}{3} \pi N_{Cu} R^3 / a^3, \quad (22)$$

$$4l_1 + 6R = a, \quad (23)$$

$$2l_1 + l_2 + 4R = a. \quad (24)$$

Зная максимальную объемную долю 45%, найдем критический размер частицы R_{max} для последующего определения минимального расстояния l_{1min} в случае одной сферы из формулы (21):

$$R_{max} = \sqrt[3]{\frac{0.45a^3}{\frac{4}{3}\pi}} \approx 0.475a \Rightarrow l_{1min} = \frac{a}{2} - R_{max} = 0.025a. \quad (25)$$

Теперь уточним R_{max} для модели с 18 частицами ($N = 18$) при той же объемной доле из уравнения (23):

$$R_{max} = \frac{a - 4l_{1min}}{6} = 0.15a. \quad (26)$$

Осталось уточнить максимальную долю для модели с 18 частицами и l_{2max} из уравнений (22), (24):

$$\varphi_{Cu-18max} = \frac{\frac{4}{3}\pi \times 18 \times (0.15a)^3}{a^3} \approx 0.255, \quad (27)$$

$$l_{2max} = a - 2l_{1min} - 4R_{max} = 0.35a. \quad (28)$$

Таким образом, максимально допустимая объемная доля для сравнительного анализа двух моделей составляет около 25.5%. Остальные параметры рассчитывались с учетом $a = 5$ мм. Также стоит отметить, что при моделировании учитывалось большее количество значащих цифр после запятой для точности, для проекции с отличным профилем действуют аналогичные расстояния и что после вычисления $\varphi_{Cu-18max}$ следует уточнить R_{max} .

В отличии от предложенных конфигураций с медью модель смолы, армированной СМФ, было решено разработать нетривиальной, поэтому было необходимо учесть:

1. Большое количество микроволокон в матрице;
2. Их распределение в заданном объеме.

Очевидно, что для решения таких задач использование только графического интерфейса ПО ABAQUS является малоэффективным, поэтому для оценки влияния углеродных микроволокон на теплопроводность композита с использованием ПО MS Excel и MATLAB был написан программный код распределения их в матрице, поскольку ABAQUS FEA имеет свой набор команд для написания скриптов на языке программирования Python.

В силу ограничения вычислительной мощности, указанного выше, было решено разработать модель смолы, содержащей 100 микроволокон. Это также объясняет решение уменьшения размеров матрицы. Поскольку такое количество волокон крайне мало и не соответствует натурному эксперименту, для сбора и анализа остальных данных использовалась формула (13) и данные экспериментов, полученные командой ЛМПКМ.

Таким образом, скрипт позволил решить проблему количества заданием цикла, создающего требуемое число волокон, а проблему их распределения – использованием генератора случайных координат, который не только распределяет волокна, но и вращает их произвольным образом. Это создает анизотропию на микроуровне и изотропию на макроуровне. Кроме того, возможности кодирования позволяют содержать полностью работоспособную модель для исследования методом конечных элементов в одном файле небольшого размера, что упрощает ее передачу между носителями информации, а также редактирование и понимание ее конструкции за счет использования любого текстового редактора.

Объекта исследования – эпоксидная смола. Данный полимер имеет высокие прочностные характеристики, малую усадку, хорошую адгезию и часто применяется при создании новых материалов на основе терморезистивного связующего.

Приведем значения физических свойств материалов, использованных для разработки моделей (таблица 1) [9, 10, 11, 12]:

Таблица 1 – Физические свойства материалов

	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{°C}}$	Удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\times\text{°C}}$
Эпоксидная смола	1150	0.17	1100
Медь	8960	400	385

Продолжение таблицы 1

Углеродные микроволокна	1810	24	450
----------------------------	------	----	-----

Возможно 2 вида теплопередачи: стационарная (Steady-state) и нестационарная (Transient). Стационарная теплопередача означает, что в любом сечении тела наблюдается постоянная температура, то есть градиент температур постоянен. Данное состояние достигается не сразу, а спустя какое-то время при протекании теплового потока вдоль тела. В связи с этим для данной симуляции был выбран режим нестационарной теплопередачи, который и характеризует все переходные процессы перед установлением теплового равновесия. Стоит отметить, что для расчета теплопроводности по выбранному методу ASTM нас интересует именно момент установления равновесного состояния, в частности, значения температур между поверхностями образцов и теплового потока в тех же местах. При том обозначенная проблема вычисления контактной теплопроводности полностью решается за счет метода конечных элементов, поскольку позволяет измерить данный параметр при идеальном контакте между образцами.

Соответственно, были заданы 2 процесса переходной теплопередачи:

1. Нагрев плит без контакта с образцами;
2. Передача аккумулированного тепла образцам для протекания переходных процессов до установления равновесного состояния, при котором будет осуществляться ход вычислений.

Роль датчика, регистрирующего температуру и тепловой поток между поверхностями образцов, выполняют сеты данных, вычисляющие необходимые характеристики.

Далее осуществляется сборка конструкции согласно установленному стандарту (рисунок 6).

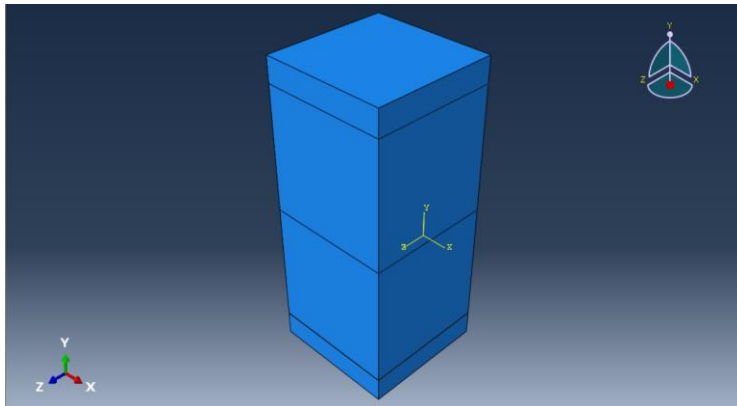


Рисунок 6 – Итоговая сборка испытуемой конструкции согласно ASTM C518-17

Необходимо задать контакт поверхностей между двумя образцами, между каждым из нагревателей и соответствующим образцом, а также между каждой частицей наполнителя и матрицей для передачи теплового потока. Именно на данном этапе и задается контактная теплопроводность (Thermal conductance) между взаимодействующими объектами. Данный параметр может зависеть от давления между поверхностями, температуры окружающей среды и зазора между поверхностями. Предполагается, что мы имеем идеальный контакт между взаимодействующими частями конструкции: высокое качество обработки поверхностей, зазоры отсутствуют. При таких условиях мы минимизируем потери энергии при прохождении теплового потока вдоль нагревателей и образцов и, следовательно, повышаем точность получаемых результатов. Для этого достаточно указать большое значение контактной теплопроводности при нулевом зазоре.

Задание граничных условий – важнейший этап при разработке конечно–элементной модели, поскольку напрямую влияет на выходные данные, и чем меньше граничных условий удастся применить, тем достовернее будут данные на выходе и тем более эффективной окажется модель.

По формуле (20) нужно задать разницу температур между плитами, которые, в свою очередь, после аккумуляции тепловой энергии передадут ее образцам. Интерфейс ABAQUS позволяет задавать разницу температур между противоположными поверхностями объектов через тепловые потоки.

Было решено задать следующие температуры: 498 К на верхней плите (Cold plate) и 698 К на нижней плите (Hot plate). Температура окружающей среды – комнатная (298 К). Расчет значений тепловых потоков осуществляется с помощью формул (3), (4). Данные тепловые потоки будут активны в течение первого этапа.

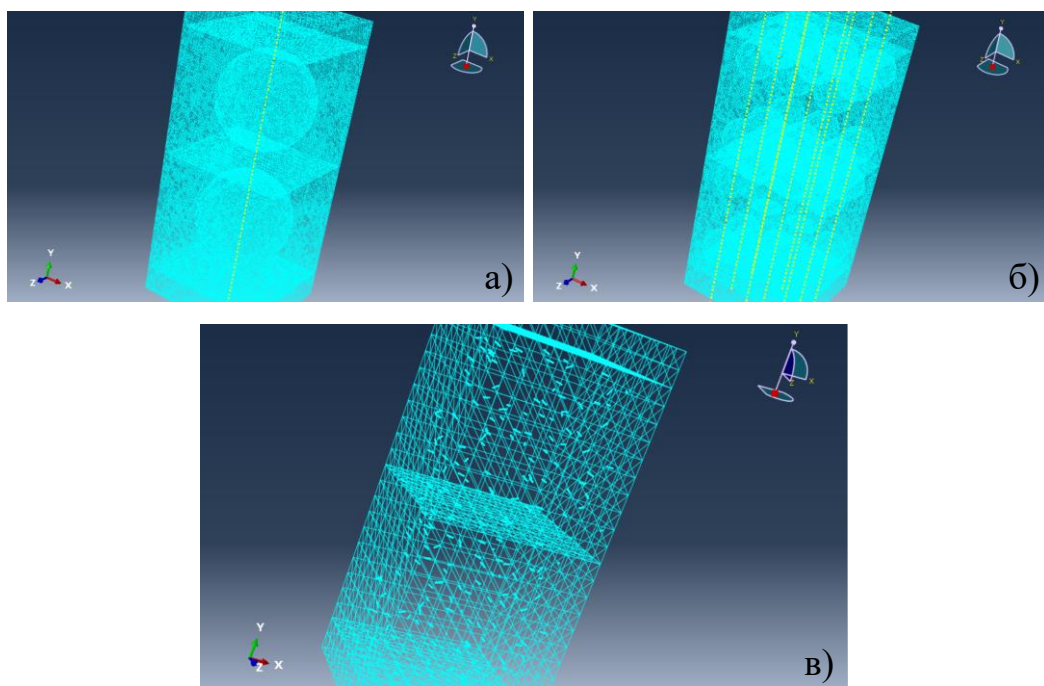
Далее, для соблюдения условия теплоизоляции, в ходе каждого испытания было задано температурное поле для всей конструкции – 298 К.

Граничные условия на втором этапе, который длится 450 с, включают в себя задание постоянных температур на поверхностях нагревателей, прилегающих к соответствующим образцам: для верхней плиты – 498 К, для нижней – 698 К.

После многократных переборов было установлено, что данный набор условий является необходимым и достаточным.

Последний шаг – дискретизация конструкции для реализации метода конечных элементов (рисунок 7).

Здесь задается тип зерен для расчета и их размеры. Чем меньше зерно, тем точнее будет результат, но и тем больше потребуется вычислительной мощности ЭВМ.



а) модель с одной сферой в центре; б) модель с 18 сферами; в) модель с углеродными микроволокнами

Рисунок 7 – Подготовленные модели к конечно–элементному анализу

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

Студенту:

Группа	ФИО
4Б71	Грибков Александр Сергеевич

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Бюджет НИП – не более 390 тыс. руб. Научно-исследовательский проект проводится в лаборатории механики полимерных композиционных материалов ИФПМ СО РАН. В работе над проектом задействованы 2 человека: руководитель и инженер</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки – 4 из 5. В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов». Норма амортизации оборудования</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды – 30.2% от ФОТ</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Потенциальные потребители результатов исследования. Анализ конкурентных решений. SWOT-анализ проекта</i>
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования. Расчет бюджетной стоимости НИП</i>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности Интегральный показатель эффективности</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. Альтернативы проведения НИ 4. График проведения и бюджет НИП 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ 	
--	--

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Маланина Вероника Анатольевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Б71	Грибков Александр Сергеевич		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности разработки и планирование финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках научно-исследовательского проекта. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на такие вопросы, как: будет ли продукт востребован на рынке? Какова будет его цена? Каков бюджет научного исследования? Какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок?

Поиск конкурирующих проектов позволяет определить необходимость и значимость новых разработок, а также их эффективность в случае успешной реализации конечного продукта.

Данный раздел предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала разработки;
- планирование научно-исследовательского проекта;
- расчет бюджета научно-исследовательского проекта;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель работы – разработка конечно–элементной модели теплопроводности полимерного композиционного материала. Данная модель позволит упростить исследование влияния различных наполнителей на теплопроводящие свойства материалов с низким значением коэффициента теплопроводности.

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

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Проект выполнен в рамках научно-исследовательской работы для ИФПМ СО РАН. Проект обладает инновационным потенциалом, выраженным в сокращении материальных и финансовых издержек за счет моделирования свойств композиционных материалов с точностью результатов натуральных экспериментов.

Целевым рынком моделирования композиционных материалов является машиностроительное производство, а в рамках данной работы – аэрокосмическая отрасль.

В целях безопасности и из-за особенностей эксплуатации к авиационной технике предъявляются высокие требования к материалам. Композиты делают возможным управление структурой и формообразованием изделий практически любой геометрии, комбинирование разных материалов, что и обуславливает их широкое применение в самолетостроении. Кроме того, сочетание различных свойств в полимерной матрице связано с главной задачей самолетостроения – снижение веса конструкции.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научно-исследовательский проект, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и

ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Основным конкурентом может являться аналогичная модель, разработанная с использованием подпрограммы, учитывающая особенности передачи тепла как в объеме матрицы, так и между матрицей и армирующими компонентами. Недостатком такой модели является потребление большего количества времени на разработку при высокой сходимости результатов в сравнении с рассматриваемым проектом. Кроме того, использование подпрограмм для реализации особенностей поведения материалов означает ограничение применения модели.

Анализ конкурентных технических решений проведен с помощью оценочной карты (таблица 7).

Экспертная оценка производилась по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5-ти бальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	Б _ф	Б _{к1}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Время проведения симуляции	0.2	5	4	1	0.8
Простота исполнения модели	0.1	4	2	0.4	0.2
Необходимые знания для корректной разработки	0.2	3	1	0.6	0.2
Точность результатов в сравнении с натурными экспериментами	0.3	4	5	0.12	0.15

Продолжение таблицы 7

Экономические критерии оценки эффективности					
Финансирование научно–исследовательского проекта	0.2	3	4	0.6	0.8
Итого	1	19	16	2.72	2.15

Из оценочной карты видно, разрабатываемая модель является конкурентоспособной, поскольку содержит только необходимые манипуляции для получения корректного результата.

4.1.3 SWOT–анализ

Для комплексной оценки научно-исследовательского проекта применяют SWOT-анализ, результатом которого является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней и внутренней среде (таблица 8).

Таблица 8 – Итоговая матрица SWOT–анализа

	Сильные стороны: С1.Наличие квалифицированного руководителя; С2.Компактность представления модели в виде программного кода распространенного языка программирования; С3.Ресурсоэффективность и экономическая эффективность проекта; С4.Широкий спектр манипуляций с моделью.	Слабые стороны: Сл1.Увеличение запаса прочности в итоговом материале; Сл2.Отсутствие квалифицированных работников для применения концепции в различных отраслях. Сл3.Ограничение геометрии композита и армирующего компонента
Возможности: В1.Использование на мировом уровне;	Использование языка программирования позволяет эксплуатировать модель	Высокие требования к знаниям по реализации симуляции, а также

Продолжение таблицы 8

<p>В2.Использование во многих отраслях; В3.Адаптация метода под иностранные языки.</p>	<p>инженерами любых стран. Конечно–элементная модель может быть адаптирована под любое машиностроительное производство.</p>	<p>граничные условия самой модели ограничивают область ее применения.</p>
<p>Угрозы: У1.Появление нового метода проведения испытаний; У2.Отсутствие спроса на разработанную модель; У3.Закрытие машиностроительных предприятий на территории РФ.</p>	<p>Внедрение более совершенного метода может снизить актуальность разрабатываемой модели. При невозможности использования модели пропадает целесообразность ее разработки.</p>	<p>Создание более точных методов измерения свойств и изготовления композитов приведет к отказу от моделирования в угоду экономии издержек. Малое количество специалистов на производстве поспособствует отказу от данной методики.</p>

По полученным данным можно сделать вывод, что высокая перспективность, компактность и гибкость настройки модели позволяют использовать ее в нескольких отраслях промышленности как на предприятиях нашей страны, так и за рубежом. Это благоприятствует развитию спроса на данный проект. Основной угрозой является возможность создания более доступного метода измерения теплопроводности материалов с нелинейными свойствами.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках научно-исследовательского проекта;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;
- построить график проведения отдельных этапов исследования.

Для выполнения данного научно-исследовательского проекта необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и инженер. Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы.

Перечень основных этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания на ВКР	Руководитель
Обзор литературы	2	Поиск материала по композиционным материалам и теплопроводящим свойствам	Инженер
	3	Изучение возможностей ПО ABAQUS для решения нестационарной задачи теплопроводности. Ознакомление со стандартизированными методами измерения теплопроводности	Инженер
	4	Изучение написания скриптов на языке программирования Python и создание генератора случайного распределения частиц на базе ПО ABAQUS	Инженер
	5	Выбор материала и стандарта	Инженер Руководитель
	6	Календарное планирование работ	Инженер Руководитель
	Теоретические и экспериментальные исследования	7	Поиск необходимого оборудования
8		Моделирование в ABAQUS	Инженер Руководитель
Обобщение и оценка результатов	9	Анализ результатов	Инженер
	10	Оценка эффективности результатов	Инженер
Составление Документации	11	Написание пояснительной записки	Инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле:

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

где $t_{min\ i}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем, человеко-дни;

$t_{max\ i}$ - максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем, человеко-дни.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p :

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i},$$

где $Ч_i$ – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу.

По всем выполняемым работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 4.

4.2.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Гантта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма состоит из блоков, расположенных на двух осях: по вертикали располагаются задачи, из которых состоит проект, а время, запланированное на их выполнение, служит горизонтальной осью диаграммы Гантта. Для построения графика Гантта следует длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого

необходимо воспользоваться следующей формулой (для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально):

$$T_{ki} = T_{pi} \times k_{\text{кал}},$$

где $k_{\text{кал}}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

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

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

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

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели инженера:

$$k_{\text{кал инж}} = \frac{366}{366 - 104 - 14} = 1.48.$$

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели руководителя:

$$k_{\text{кал рук}} = \frac{366}{366 - 53 - 14} = 1.22.$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе необходимо округлить до целого числа (таблица 10).

После произведенных расчетов строится диаграмма Ганта (таблица 11).

Таблица 10 – Временные показатели проведения научно–исследовательского проекта

Название работы	Трудоемкость работ			Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ож i}$, чел-дни		

Продолжение таблицы 10

	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания на ВКР	1	-	2	-	1.4	-	1.4	-	2	-
Поиск материала по композиционным материалам и теплопроводящим свойствам	-	2	-	4	-	2.8	-	2.8	-	5
Изучение возможностей ПО ABAQUS для решения нестационарной задачи теплопроводности. Ознакомление со стандартизированными методами измерения теплопроводности	-	5	-	8	-	6.2	-	6.2	-	10
Изучение написания скриптов на языке программирования Python и создание генератора случайного распределения частиц на базе ПО ABAQUS	-	50	-	60	-	54	-	54	-	80
Выбор материала и стандарта	1	1	2	2	1.4	1.4	0.7	0.7	1	2
Календарное планирование работ	1	1	2	2	1.4	1.4	0.7	0.7	1	2
Поиск необходимого оборудования	1	1	2	2	1.4	1.4	0.7	0.7	1	2
Моделирование в ABAQUS	20	20	20	30	20	24	10	12	13	18

Продолжение таблицы 10

Анализ результатов	-	14	-	21	-	16.8	-	16.8	-	25
Оценка эффективности результатов	-	3	-	5	-	3.8	-	3.8	-	6
Написание пояснительной записки	-	5	-	10	-	7	-	7	-	11
Итого									18	161

Таблица 11 – Календарный план–график

№	Вид работы	Исполнитель	T _к	Продолжительность выполнения работ																		
				дек			январь			февраль			март			апрель			май			июнь
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1		
1	Составление и утверждение технического задания на ВКР	Руководитель	2	■																		
2	Поиск материала по композиционным материалам и теплопроводящим свойствам	Инженер	5	▨																		
3	Изучение возможностей ПО ABAQUS для решения нестационарной задачи теплопроводности. Ознакомление со стандартизированными методами измерения теплопроводности	Инженер	10		▨																	
4	Изучение написания скриптов на язык программирования Python и создание генератора случайного распределения частиц на базе ПО ABAQUS	Инженер	80			▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨			
5	Выбор материала и стандарта для проведения эксперимента	Инженер	2																			
		Руководитель	1																			
6	Календарное планирование работ	Инженер	2																			
		Руководитель	1																			
7	Поиск необходимого оборудования	Инженер	2																			
		Руководитель	1																			
8	Моделирование в ABAQUS	Инженер	18																			
		Руководитель	13											■								
9	Анализ полученных результатов	Инженер	25														▨					
10	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер	6																▨			
11	Написание пояснительной записки	Инженер	11																▨			

▨ – Инженер ■ – Руководитель

4.3 Бюджет научно-исследовательского проекта

4.3.1 Расчет материальных затрат научно-исследовательского проекта

Поскольку в данной работе в материальные затраты включаются только затраты на канцелярские принадлежности, то они учтутся при подсчете накладных расходов.

4.3.2 Расчет амортизации оборудования

Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НИП и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений (таблица 12).

НДС составляет 20%.

Таблица 12 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы Оборудования без НДС, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	системный блок	1	3	66400	66400
2	монитор	1		7665.8	7665.8
3	клавиатура	1		415.8	415.8
4	мышь	1		291.7	291.7
Итого					74773.3

Расчет амортизации линейным методом проводится следующим образом:

$$A = \frac{ПС}{n \times 12},$$

где ПС – первоначальная стоимость основного средства, руб.;

n – срок полезного использования, лет.

Тогда амортизация на ПК составит:

$$A = \frac{74773.3}{3 \times 12} \approx 2077 \frac{\text{руб}}{\text{мес}}$$

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей НИИ

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, непосредственно участвующих в выполнении работ. Также необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой окладов и тарифных ставок.

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ одного сотрудника предприятия рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} T_p,$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата, руб.;

T_p – продолжительность работ, выполняемых сотрудником, дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m M}{F_d},$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн.

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} (1 + k_{\text{пр}} + k_d) k_p,$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_d – коэффициент доплат и надбавок.

Значение k_d примем равным 20%.

Для определения годового фонда составим баланс рабочего времени (таблица 13).

Таблица 13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	53/14	104/14
– праздничные дни		
Потери рабочего времени		
– отпуск	48/3	24/6
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	248	218

Для Томской области районный коэффициент равен 1.3.

Соответственно, для шестидневной недели руководителя и пятидневной инженера справедливо:

$$Z_{\text{м рук}} = 24615 \times (1 + 0.3 + 0.2) \times 1.3 = 47999 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{м инж}} = 11738 \times (1 + 0.3 + 0.2) \times 1.3 = 22889 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{дн рук}} = \frac{47999 \times 10.4}{248} = 2013 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{дн инж}} = \frac{22889 \times 11.2}{218} = 1176 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{осн рук}} = 2013 \times 18 = 36243 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{осн инж}} = 1176 \times 161 = 189336 \text{ руб.}$$

Представим итоговые значения в табличной форме (таблица 14).

Таблица 14 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$	$Z_{\text{дн}}$	$T_{\text{р}}$	$Z_{\text{осн}}$
Руководитель	24615	0.3	0.2	1.3	47999	2013	18	36243
Инженер	11738	0.3	0.2	1.3	22889	1176	161	189336
Итого								225579

4.3.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} З_{\text{осн}},$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы.

Значение $k_{\text{доп}}$ примем равным 0.13.

Соответственно, для руководителя и инженера:

$$\begin{aligned} З_{\text{доп рук}} &= 36243 \times 0.13 = 4711.59 \text{ руб.}, \\ З_{\text{доп инж}} &= 189336 \times 0.13 = 24613.68 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Таким образом, заработная плата руководителя и инженера:

$$\begin{aligned} З_{\text{зп рук}} &= 36243 + 4711.59 = 40954.59 \text{ руб.}, \\ З_{\text{зп инж}} &= 189336 + 24613.68 = 213949.68 \text{ руб.} \end{aligned}$$

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} З_{\text{зп}},$$

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

Значение $k_{\text{внеб}}$ рассчитывается по общему правилу в 2021 году согласно ст. 425 НК РФ на основании:

- ОПС: 22%;
- ОМС: 5.1%;
- ВНИМ: 2.9%;
- тариф взноса на травматизм (код ОКВЭД 72.19): 0.2%.

Тогда для руководителя и инженера соответственно:

$$\begin{aligned} З_{\text{внеб рук}} &= 0.302 \times 40954.59 = 12368.3 \text{ руб.}, \\ З_{\text{внеб инж}} &= 0.302 \times 213949.68 = 64612.8 \text{ руб.} \end{aligned}$$

4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя прочие затраты, не вошедшие в предыдущие статьи.

Накладные расходы в целом рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \sum_{i=1}^5 \text{статья раздела 1.3}_i,$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Значение $k_{\text{внеб}}$ примем равным 16%.

Тогда:

$$Z_{\text{накл}} = 0.16 \times (2077 + 225579 + 29325.27 + 76981.1) \approx 53434 \text{ руб.}$$

4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат НИП защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно–технической продукции (таблица 15).

Таблица 15 – Расчет бюджета затрат НИП

Наименование статьи	Сумма, руб.
Амортизация оборудования	2077
Основная заработная плата	225579
Дополнительная заработная плата	29325.27
Отчисления во внебюджетные фонды	76981.1
Накладные расходы	53434
Бюджет затрат НИП	387396.37

4.4 Определение ресурсной, финансовой и экономической эффективности проекта

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

Поскольку любые аналоги проекта представляют собой модели, в разной степени учитывающие особенности поведения системы, а их вывод на рынок, как и предоставление каких-либо данных по ним, как правило, не оглашается, данный проект является уникальным.

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{фин р}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения, руб.;

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

При расчете базы интегрального финансового показателя примем, что у конкурентов один из самых дорогих системных блоков в составе ПК на данный момент (стоимость на сайте DNS составит 391665.8 руб без учета НДС). Тогда, после пересчета амортизации оборудования, интегральные финансовые показатели разработок определим как:

$$I_{\text{фин р}}^{\text{исп } 1} = \frac{387396.37}{396847.97} = 0.976,$$
$$I_{\text{фин р}}^{\text{исп } 2} = \frac{396847.97}{396847.97} = 1.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает численное удешевление стоимости разработки в размах.

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

$$I_{\text{pi}} = \sum a_i b_i,$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Для оценки характеристик воспользуемся данными таблицы 1 (таблица 16).

Таблица 16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	
		Бф	Бк1
Время проведения симуляции	0.25	5	4
Простота исполнения модели	0.15	4	2
Необходимые знания для корректной разработки	0.25	3	1
Точность результатов в сравнении с натурными экспериментами	0.35	4	5
Итого	1	16	12

Таким образом,

$$I_{p-исп1} = 5 \times 0.25 + 4 \times 0.15 + 3 \times 0.25 + 4 \times 0.35 = 4,$$

$$I_{p-исп2} = 4 \times 0.25 + 2 \times 0.15 + 1 \times 0.25 + 5 \times 0.35 = 3.3.$$

Тогда:

$$I_{исп1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{фин\ p}} = \frac{4}{0.976} = 4.1,$$

$$I_{исп2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{фин\ p}} = \frac{3.3}{1} = 3.3.$$

Наконец, сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}} = \frac{4.1}{3.3} = 1.24.$$

Обобщим полученные данные для удобства (таблица 17).

Таблица 17 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Разработка	Аналог
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0.976	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4	3.3
3	Интегральный показатель эффективности	4.1	3.3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.24	1

Вывод

В результате проведенного анализа конкурентных технических решений оказалось, что разрабатываемый проект является более конкурентоспособным, чем его аналог. Конкурентным преимуществом разработки является сочетание только необходимых манипуляций для получения корректного результата.

При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Количество календарных дней для выполнения работы составило 161 день, из которых для инженера отведено – 161, а для руководителя – 18.

Составлен бюджет проекта, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта – 387396.37 рублей;

Оценка эффективности научно-исследовательского проекта показала, что:

1. значение интегрального финансового показателя НИП составляет 0,976, что является показателем того, что научно-исследовательский проект является финансово выгодным по сравнению с аналогом;
2. значение интегрального показателя ресурсоэффективности научно-исследовательского проекта составляет 4, а конкурента – 3.3;
3. значение интегрального показателя эффективности НИП составляет 4.1, а конкурента – 3.3, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в НИП, является наиболее эффективным вариантом исполнения.