

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



УТВЕРЖДАЮ
Исполнительный директор
программы развития,
руководитель научно-
исследовательской политики
Г.Н. Суворов
«25» мая 2026 г.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Рабочая программа
для обучающихся по научной специальности
2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника
форма обучения (очная)

Пономарев К. О. Численное моделирование и цифровые двойники процессов тепломассопереноса в теплотехнических системах. Рабочая программа для обучающихся по научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника, форма обучения (очная). Тюмень, 2026.

Рабочая программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации и срокам освоения, утвержденными приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951, с учетом изменений, внесенных приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 3 июня 2025 г. № 466.

Рабочая программа дисциплины (модуля) «Численное моделирование и цифровые двойники процессов тепломассопереноса в теплотехнических системах» опубликована на сайте ТюмГУ: [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

1. Цели и задачи освоения дисциплины (модуля)

1.1. Актуальность, предназначение и место дисциплины в программе аспирантуры

Дисциплина «Численное моделирование и цифровые двойники процессов тепломассопереноса в теплотехнических системах» относится к образовательному компоненту программы аспирантуры и является элективной дисциплиной по выбору аспиранта по научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Дисциплина обеспечивает углубленную подготовку аспирантов в области построения, численной реализации, верификации, валидации и применения физико-математических моделей процессов тепломассопереноса, а также разработки расчетных цифровых двойников теплотехнических систем для анализа, прогноза и оптимизации их тепловых режимов. Содержание дисциплины непосредственно связано с направлениями паспорта научной специальности 2.4.6, включающими теплофизические свойства веществ и флюидонасыщенных горных пород, совместный перенос массы, импульса и энергии, тепло- и массообмен в одно- и многофазных системах, тепловые режимы, энергоэффективность, расчетно-экспериментальные методы исследования и моделирование теплотехнических процессов.

Дисциплина логически и содержательно связана с научным компонентом программы аспирантуры, научно-педагогической практикой, итоговой аттестацией, специальной дисциплиной «Теоретическая и прикладная теплотехника», а также с элективными дисциплинами, посвященными многофазному тепломассопереносу, тепловым режимам автономных систем, систем накопления энергии и низкоуглеродным энергетическим технологиям.

Для освоения дисциплины аспирант должен владеть базовыми знаниями в области термодинамики, теплопроводности, конвективного теплообмена, массообмена, механики жидкости и газа, фазовых превращений, фильтрации в пористых средах, математического анализа, дифференциальных уравнений и основ программирования.

Дисциплина ориентирована на аспирантов, выполняющих исследования по численному моделированию процессов тепло- и массопереноса, моделированию теплового режима теплотехнических и энергетических систем, сопряженному теплообмену в теплопередающих и теплоиспользующих установках, тепломассопереносу в пористых средах, скважинах и трубопроводах, цифровым двойникам теплотехнических систем и процессов, верификации, валидации, анализу неопределенности и оптимизации параметров теплотехнических процессов и оборудования.

1.2. Цель дисциплины

Целью освоения дисциплины «Численное моделирование и цифровые двойники процессов тепломассопереноса в теплотехнических системах» является формирование у аспирантов углубленных знаний и исследовательских навыков в области построения, численной реализации, верификации и применения физико-математических моделей тепломассопереноса, а также разработки расчетных цифровых двойников теплотехнических систем для анализа, прогноза и оптимизации их тепловых режимов.

Дисциплина направлена на подготовку аспирантов к самостоятельному выполнению научных исследований по научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника, включая постановку задач теплопроводности, конвективного теплообмена, сопряженного теплообмена, многофазного тепломассопереноса, процессов переноса в пористых средах, теплообменных аппаратах, скважинах, трубопроводах, энергетическом и тепловыделяющем оборудовании.

Под цифровым двойником в рамках дисциплины понимается расчетно-аналитическая и информационная модель теплотехнической системы, основанная на физических закономерностях тепломассопереноса, численных методах, экспериментальных или эксплуатационных данных и предназначенная для воспроизведения, анализа, прогноза и оптимизации теплового состояния объекта. Такая постановка не подменяет задачи теоретической и прикладной теплотехники задачами автоматизированного управления, создания приборов или первичных преобразователей.

1.3. Задачи дисциплины

- 1) Сформировать у аспирантов системное представление о численном моделировании как методе исследования процессов тепломассопереноса в теплотехнических системах.
- 2) Изучить основные этапы построения физико-математической модели: выбор объекта, выделение существенных физических механизмов, формулировка допущений, определение параметров, начальных и граничных условий.
- 3) Рассмотреть основные классы уравнений, применяемых при моделировании тепломассопереноса: уравнение теплопроводности, уравнения конвективного теплообмена, уравнения переноса массы, импульса и энергии, модели турбулентности, модели многофазных и пористых сред.
- 4) Освоить базовые подходы к численному решению задач теплопереноса и тепломассопереноса: метод конечных разностей, метод конечных объемов, метод конечных элементов, элементы сеточного моделирования, итерационные методы и методы решения нестационарных задач.
- 5) Сформировать навыки оценки корректности расчетной модели: проверка размерности, анализ устойчивости, сходимости, чувствительности, погрешности, верификации и валидации.
- 6) Рассмотреть современные подходы к построению цифровых двойников теплотехнических систем на основе физико-математических моделей, расчетных данных, экспериментальных данных, методов понижения порядка моделей и подходов, управляемых данными.
- 7) Изучить особенности численного моделирования процессов тепломассопереноса в теплообменных аппаратах, трубопроводах, скважинах, пористых средах, энергетическом и тепловыделяющем оборудовании.
- 8) Развить способность аспирантов применять численные модели и цифровые двойники для решения научных задач, связанных с темой диссертационного исследования.

2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины (модуля)

В результате освоения элективной дисциплины «Численное моделирование и цифровые двойники процессов тепломассопереноса в теплотехнических системах» у обучающегося формируются профессиональные компетенции, обеспечивающие готовность к постановке и решению научных задач в области теоретической и прикладной теплотехники, применению расчетных, экспериментальных, расчетно-экспериментальных, численных и информационных методов исследования, а также к обоснованию достоверности, научной новизны и практической значимости полученных результатов.

Код	Наименование компетенции	Планируемый результат освоения дисциплины
ПК-1	Способность обосновывать и формулировать научную задачу в области теоретической и прикладной теплотехники, включая определение актуальности, цели, задач, объекта, предмета, гипотезы, физической и математической постановки исследования, а также его соответствия паспорту научной специальности 2.4.6	Аспирант способен обосновать актуальность и научную постановку задачи по одному из направлений теоретической и прикладной теплотехники, определить объект, предмет, цель, задачи, гипотезу, физическую и математическую модель исследования и показать соответствие темы паспорту специальности 2.4.6.
ПК-2	Способность применять расчетные, экспериментальные, расчетно-экспериментальные, численные и информационные методы исследования термодинамических, теплогидравлических и тепломассопереносных процессов в	Аспирант способен выбирать и применять аналитические, расчетные, экспериментальные, расчетно-экспериментальные, численные и информационные методы для исследования термодинамических,

	теплотехнических системах, одно- и многофазных, пористых, флюидонасыщенных и мерзлых средах, включая обработку, верификацию, валидацию и интерпретацию полученных результатов	теплогидравлических и тепломассопереносных процессов, обрабатывать и интерпретировать результаты с учетом области применимости моделей и исходных допущений.
ПК-3	Способность обосновывать достоверность, научную новизну, теоретическую и практическую значимость результатов исследований в области теоретической и прикладной теплотехники, представлять и апробировать их в форме диссертации, научных публикаций, докладов, отчетов, результатов интеллектуальной деятельности и материалов научно-образовательной деятельности	Аспирант способен обосновывать достоверность, научную новизну, теоретическую и практическую значимость результатов исследования по профилю специальности 2.4.6, представлять их в форме научного доклада, аналитического обзора, экзаменационного ответа, раздела диссертации и иных научно-образовательных материалов.

2.1. Планируемые результаты освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- основные принципы построения физико-математических моделей процессов тепломассопереноса;
- классификацию задач теплопроводности, конвективного теплообмена, сопряженного теплообмена, массопереноса, многофазного течения и переноса в пористых средах;
- основные уравнения переноса массы, импульса и энергии в теплотехнических системах;
- методы дискретизации уравнений тепломассопереноса;
- основные положения метода конечных разностей, метода конечных объемов и метода конечных элементов применительно к задачам теплотехники;
- особенности численного решения стационарных и нестационарных задач тепломассопереноса;
- понятия устойчивости, сходимости, аппроксимации, численной диффузии, погрешности и вычислительной устойчивости;
- основы верификации и валидации расчетных моделей;
- принципы построения цифровых двойников теплотехнических систем;
- различия между физико-математической моделью, расчетной моделью, имитационной моделью, цифровой моделью и цифровым двойником;
- современные подходы к интеграции расчетных моделей, экспериментальных данных и данных эксплуатации;
- границы применимости цифровых двойников.

Уметь:

- формулировать физическую и математическую постановку задачи тепломассопереноса;
- выбирать расчетную область, переменные, параметры, начальные и граничные условия;
- обосновывать допущения модели и оценивать их влияние на результат;
- выполнять дискретизацию простейших задач теплопроводности, конвекции, массопереноса и фильтрации;
- выбирать численный метод с учетом физической постановки задачи;
- анализировать устойчивость, сходимость и точность расчетной схемы;
- интерпретировать результаты численного моделирования с физической точки зрения;
- выполнять сравнение расчетных результатов с аналитическими решениями, экспериментальными данными или литературными данными;
- формировать структуру цифрового двойника теплотехнической системы;
- использовать расчетные модели для анализа тепловых режимов, выявления критических параметров и оценки эффективности теплотехнических решений;

- представлять результаты моделирования в форме научного доклада, статьи, отчета или раздела диссертации.

Владеть:

- терминологией вычислительной теплофизики, численного моделирования и цифровых двойников;
- навыками постановки расчетных задач тепломассопереноса;
- навыками анализа и критической оценки расчетных моделей;
- навыками работы с расчетными алгоритмами и специализированным программным обеспечением;
- навыками верификации, валидации и анализа чувствительности моделей;
- навыками построения расчетной логики цифрового двойника теплотехнической системы;
- навыками подготовки научного обзора по современным методам численного моделирования и цифровых двойников в теплотехнических системах.

3. Структура и объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **3 зачетные единицы, 108 академических часов**. Дисциплина реализуется в 4-м семестре; форма промежуточной аттестации – дифференцированный зачет.

Таблица 1

Вид учебной работы	Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
		<i>4-й семестр</i>
Общий объем зач. ед. час	3	3
	108	108
Из них:		
Часы аудиторной работы (всего):	22	22
Лекции	12	12
Практические занятия	10	10
Лабораторные / практические занятия по подгруппам	0	0
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося	50	50
Вид промежуточной аттестации (диф. зачет, кандидатский экзамен, экзамен)	36	Дифференцированный зачет 36

4. Система оценивания

4.1. Текущий контроль и учет его результатов при промежуточной аттестации

Текущий контроль проводится в течение периода освоения дисциплины и направлен на проверку теоретической подготовки, расчетно-аналитических навыков, способности работать с научной литературой, формулировать физико-математическую и численную постановку задачи, разрабатывать структуру расчетного цифрового двойника и связывать содержание дисциплины с темой диссертационного исследования и паспортом научной специальности 2.4.6.

Текущий контроль включает:

- участие в семинарских занятиях и научных обсуждениях;
- выполнение расчетно-аналитического задания;
- подготовку аналитического обзора современной научной литературы;
- подготовку концепции цифрового двойника теплотехнической системы или процесса;

- подготовку и защиту итогового доклада (презентации) по тематике дисциплины, связанной с направлением диссертационного исследования аспиранта.

Вид работы	Максимальное количество баллов
Участие в семинарских занятиях и научных обсуждениях	15
Расчетно-аналитическое задание	25
Аналитический обзор современной научной литературы	20
Концепция цифрового двойника теплотехнической системы или процесса	20
Итоговый доклад (презентация) по теме дисциплины	20
Итого	100

Баллы	Оценка
91-100	отлично
76-90	хорошо
61-75	удовлетворительно
60 и менее	неудовлетворительно

Результаты текущего контроля используются для допуска аспиранта к дифференцированному зачету и учитываются при выставлении итоговой оценки по дисциплине.

4.2. Условия допуска к дифференцированному зачету

К дифференцированному зачету по дисциплине «Численное моделирование и цифровые двойники процессов тепломассопереноса в теплотехнических системах» допускается аспирант, который:

- 1) освоил основные разделы дисциплины;
- 2) принял участие в семинарских занятиях и научных обсуждениях;
- 3) выполнил предусмотренные рабочей программой дисциплины виды текущего контроля в объеме, достаточном для получения положительной оценки;
- 4) выполнил расчетно-аналитическое задание и / или аналитический обзор современной научной литературы;
- 5) подготовил концепцию цифрового двойника теплотехнической системы или процесса;
- 6) подготовил итоговый доклад (презентацию) по теме дисциплины или теме, связанной с диссертационным исследованием;
- 7) продемонстрировал способность связать содержание дисциплины с паспортом научной специальности 2.4.6;
- 8) не имеет академической задолженности по дисциплине;
- 9) выполнил требования, установленные рабочей программой дисциплины и локальными нормативными актами университета.

При наличии неудовлетворительных результатов текущего контроля аспиранту может быть предложена доработка соответствующих материалов до прохождения дифференцированного зачета.

5. Содержание дисциплины

5.1. Тематический план дисциплины

Таблица 2

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины (модуля), час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Иные виды контактной работы
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
	Часов в 4 семестре	58	12	10	0	36
	Численное моделирование и цифровые двойники процессов теплопереноса в теплотехнических системах	58	12	10	0	36
1.	Физико-математическое моделирование процессов теплопереноса	2	2	0	0	0
2.	Численные методы решения задач теплопроводности, конвекции и теплопереноса	4	2	2	0	0
3.	Моделирование сопряженного, многофазного теплопереноса и теплопереноса в пористых средах	4	2	2	0	0
4.	Верификация, валидация, анализ чувствительности и неопределенности расчетных моделей	4	2	2	0	0
5.	Цифровые двойники теплотехнических систем: структура, данные, модели и расчетные сценарии	4	2	2	0	0
6.	Прикладные расчетные задачи	4	2	2	0	0

	теплотехнических, нефтегазовых и энергетических систем					
7.	Промежуточная аттестация: дифференцированный зачет	36	0	0	0	36
	Итого (часов)	58	12	10	0	36

Самостоятельная работа обучающегося в объеме 50 академических часов планируется в разделе 6 настоящей рабочей программы.

5.2. Содержание дисциплины (модуля) по темам

Тема 1. Физико-математическое моделирование процессов тепломассопереноса

Математическая модель как инструмент исследования теплотехнической системы. Физическая постановка задачи. Выделение объекта, расчетной области, фаз, параметров и определяющих процессов. Основные уравнения тепломассопереноса: уравнение теплопроводности, уравнения сохранения массы, импульса и энергии, уравнения переноса компонентов, уравнения состояния и замыкающие соотношения. Стационарные и нестационарные задачи. Линейные и нелинейные модели. Прямые и обратные задачи. Допущения модели и область применимости.

Тема 2. Численные методы решения задач теплопроводности, конвекции и массопереноса

Основные принципы дискретизации расчетной области. Метод конечных разностей. Метод конечных объемов. Метод конечных элементов. Явные и неявные схемы. Аппроксимация производных. Сетка, расчетная ячейка, контрольный объем. Устойчивость, сходимость, численная диффузия и дисперсия. Особенности решения нестационарных задач теплопроводности. Расчет конвективного переноса. Дискретизация граничных условий первого, второго и третьего рода.

Тема 3. Моделирование сопряженного, многофазного тепломассопереноса и тепломассопереноса в пористых средах

Сопряженный теплообмен в системах «твердое тело – жидкость/газ». Моделирование теплообмена в каналах, трубопроводах, теплообменных аппаратах и тепловыделяющем оборудовании. Модели многофазных течений и межфазного обмена. Тепломассоперенос в пористых средах. Неизотермическая фильтрация. Фазовые превращения и источниковые члены в уравнениях переноса. Особенности задания эффективных свойств, межфазных коэффициентов и замыкающих зависимостей.

Тема 4. Верификация, валидация, анализ чувствительности и неопределенности расчетных моделей

Понятия верификации и валидации. Проверка реализации численного алгоритма. Сравнение с аналитическими решениями, эталонными задачами, экспериментальными и литературными данными. Сеточная сходимость. Анализ влияния шага по времени и пространству. Проверка балансов массы и энергии. Анализ чувствительности расчетных результатов к входным параметрам. Источники неопределенности: свойства материалов, граничные условия, эмпирические зависимости, экспериментальные данные, численные параметры.

Тема 5. Цифровые двойники теплотехнических систем: структура, данные, модели и расчетные сценарии

Понятие цифрового двойника теплотехнической системы. Отличие цифровой модели, имитационной модели и цифрового двойника. Структура цифрового двойника: физическая модель, расчетная модель, база параметров, данные измерений или эксплуатации, алгоритмы обновления, сценарии расчетного эксперимента, визуализация и интерпретация результатов. Методология построения моделей: от физически обоснованных (physics-based) до суррогатных моделей и подходов, управляемых данными (data-driven). Методы редуцирования (понижения размерности) моделей и основы физически-информированного машинного обучения. Ограничения цифровых

двойников. Цифровой двойник как инструмент научного анализа, прогноза и оптимизации параметров, но не как система автоматизированного управления.

Тема 6. Прикладные расчетные задачи теплотехнических, нефтегазовых и энергетических систем

Моделирование теплового режима теплообменных аппаратов, трубопроводов, скважин, резервуаров, пористых сред, энергетического оборудования и систем теплоснабжения. Расчет тепловых потерь и тепловых нагрузок. Моделирование процессов охлаждения, нагрева, фазовых превращений и тепловой защиты. Расчетные сценарии для анализа энергоэффективности и тепловой безопасности. Использование Python, GNU Octave, OpenFOAM, tNavigator и иных программных средств для решения исследовательских задач. Подготовка расчетного фрагмента для диссертационного исследования.

5.3. Тематика практических и семинарских занятий

- 1) Формулировка физической и математической постановки задачи тепломассопереноса в теплотехнической системе.
- 2) Построение расчетной схемы нестационарной задачи теплопроводности с заданными граничными условиями.
- 3) Сравнение явной и неявной конечно-разностных схем для задачи теплопереноса.
- 4) Постановка задачи сопряженного теплообмена в системе «твердое тело – поток теплоносителя».
- 5) Моделирование источникового члена в задачах тепловыделения, фазового перехода или химической реакции.
- 6) Анализ сеточной сходимости и влияния шага по времени на результат расчета.
- 7) Проверка теплового баланса расчетной модели.
- 8) Разработка структуры цифрового двойника теплотехнической системы.
- 9) Обсуждение современных научных публикаций по цифровым двойникам и численному моделированию тепломассопереноса.
- 10) Представление индивидуальной расчетной постановки, связанной с темой диссертационного исследования аспиранта.

5.4. Образцы средств для проведения текущего контроля

В качестве образцов средств текущего контроля используются расчетно-аналитические задания, аналитический обзор современной научной литературы, концепция цифрового двойника теплотехнической системы или процесса, итоговый научный доклад (презентация) и устное собеседование. Детализированные требования к оценочным средствам приведены в разделе 7 настоящей рабочей программы и в оценочных материалах по дисциплине.

6. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа аспиранта включает изучение теоретических материалов по разделам дисциплины, анализ современных научных публикаций по численному моделированию тепломассопереноса и цифровым двойникам теплотехнических систем, выполнение расчетно-аналитического задания, подготовку аналитического обзора литературы, подготовку концепции цифрового двойника выбранного теплотехнического объекта или процесса, подготовку доклада по теме, связанной с диссертационным исследованием, и подготовку к дифференцированному зачету.

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1.	Физико-математическое моделирование процессов теплообмена	Проработка учебной и научной литературы; подготовка конспекта по физической и математической постановке задач; выделение расчетной области, параметров, начальных и граничных условий для выбранной теплотехнической системы.
2.	Численные методы решения задач теплопроводности, конвекции и массообмена	Решение задач по дискретизации уравнений теплопроводности и конвективного переноса; сравнение явных и неявных схем; анализ устойчивости, сходимости и численной погрешности.
3.	Моделирование сопряженного, многофазного теплообмена и теплообмена в пористых средах	Подготовка фрагмента расчетной постановки по сопряженному теплообмену, многофазному переносу, фазовому переходу или неизоэнтальной фильтрации; анализ источников членов и замыкающих соотношений.
4.	Верификация, валидация, анализ чувствительности и неопределенности расчетных моделей	Подготовка схемы проверки расчетной модели; анализ сеточной независимости, баланса массы и энергии, чувствительности к входным параметрам; подбор эталонных, экспериментальных или литературных данных для сопоставления.
5.	Цифровые двойники теплотехнических систем: структура, данные, модели и расчетные сценарии	Разработка концепции расчетного цифрового двойника: объект, входные данные, выходные показатели, расчетные сценарии, физико-математическая модель, способы верификации, валидации и ограничения применимости.
6.	Прикладные расчетные задачи теплотехнических, нефтегазовых и энергетических систем	Подготовка расчетного фрагмента, связанного с темой диссертации; выбор программных средств, структуры расчетного эксперимента, способов визуализации и интерпретации результатов; подготовка итогового доклада.

Рекомендуемые темы самостоятельных работ

- 1) Численное моделирование нестационарной теплопроводности в твердом теле.
- 2) Конечно-разностные схемы для задач теплообмена: устойчивость и сходимость.
- 3) Метод конечных объемов в задачах конвективного теплообмена.
- 4) Сопряженный теплообмен в теплообменных аппаратах.
- 5) Моделирование фазовых превращений в задачах теплообмена.
- 6) Численное моделирование теплового режима трубопроводов.
- 7) Численное моделирование теплового режима скважины или призабойной зоны.
- 8) Моделирование неизоэнтальной фильтрации в пористой среде.
- 9) Анализ теплового баланса расчетной модели.
- 10) Верификация расчетной модели на основе аналитического решения.
- 11) Валидация расчетной модели на основе экспериментальных данных.
- 12) Анализ чувствительности теплотехнической модели к теплофизическим параметрам.
- 13) Цифровой двойник теплообменного аппарата.
- 14) Цифровой двойник трубопроводной или скважинной системы.
- 15) Физически-информированные методы в моделировании процессов теплообмена.

- 16) Суррогатные модели и модели пониженного порядка в задачах теплотехники.
- 17) Цифровые двойники для анализа энергоэффективности теплотехнических систем.
- 18) Ограничения и риски применения цифровых двойников в инженерных теплотехнических расчетах.

7. Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю)

7.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

Форма проведения промежуточной аттестации – дифференцированный зачет. Дифференцированный зачет проводится в форме устного собеседования по вопросам дисциплины с учетом выполненных аспирантом работ текущего контроля: расчетно-аналитического задания, аналитического обзора, концепции цифрового двойника и итогового доклада (презентации).

На дифференцированном зачете оцениваются: знание теоретических основ дисциплины; понимание физических механизмов тепломассопереноса; способность формулировать физическую, математическую и численную постановку задачи; умение выбирать расчетную схему, параметры, начальные и граничные условия; способность объяснять устойчивость, сходимость, погрешность и сеточную независимость; понимание процедур верификации и валидации расчетных моделей; способность предложить структуру цифрового двойника теплотехнической системы; способность связывать содержание дисциплины с темой диссертации и паспортом 2.4.6.

7.1.1. Примерные вопросы для текущего контроля и дифференцированного зачета

- 1) Физико-математическая модель теплотехнической системы: назначение, структура, ограничения.
- 2) Основные этапы постановки задачи численного моделирования тепломассопереноса.
- 3) Физическая, математическая, численная, расчетная и цифровая модель: различия и взаимосвязь.
- 4) Выбор объекта моделирования, расчетной области, параметров и определяющих физических процессов.
- 5) Уравнение теплопроводности и его численная реализация.
- 6) Начальные и граничные условия в задачах теплопереноса.
- 7) Граничные условия первого, второго и третьего рода.
- 8) Дискретизация расчетной области: сетка, расчетная ячейка, контрольный объем.
- 9) Метод конечных разностей в задачах теплопроводности.
- 10) Явные и неявные расчетные схемы.
- 11) Устойчивость и сходимость численного решения.
- 12) Аппроксимация, численная погрешность и численная диффузия.
- 13) Метод конечных объемов в задачах конвективного теплообмена.
- 14) Метод конечных элементов в задачах теплопереноса.
- 15) Особенности численного решения нестационарных задач тепломассопереноса.
- 16) Моделирование конвективного тепломассопереноса.
- 17) Сопряженный теплообмен: физическая постановка и расчетные особенности.
- 18) Моделирование теплообмена в каналах, трубопроводах и теплообменных аппаратах.
- 19) Моделирование тепломассопереноса в пористых средах.
- 20) Моделирование неизотермической фильтрации.
- 21) Моделирование многофазного тепломассопереноса.
- 22) Моделирование фазовых превращений в задачах тепломассопереноса.
- 23) Источниковые члены в уравнениях тепломассопереноса.
- 24) Проверка баланса массы и энергии в расчетной модели.
- 25) Верификация численной модели.
- 26) Валидация расчетной модели.
- 27) Сеточная сходимость и анализ влияния расчетной сетки.
- 28) Анализ чувствительности расчетной модели.

- 29) Понятие неопределенности в численном моделировании.
- 30) Источники неопределенности: свойства материалов, граничные условия, эмпирические зависимости, экспериментальные данные и численные параметры.
- 31) Цифровая модель, имитационная модель и цифровой двойник: сходство и различия.
- 32) Структура цифрового двойника теплотехнической системы.
- 33) Роль экспериментальных и эксплуатационных данных в цифровом двойнике.
- 34) Расчетные сценарии цифрового двойника теплотехнической системы.
- 35) Модели пониженного порядка в цифровых двойниках.
- 36) Суррогатные модели в задачах тепломассопереноса.
- 37) Методы машинного обучения, учитывающие физические закономерности тепломассопереноса.
- 38) Цифровой двойник как инструмент прогноза теплового режима.
- 39) Цифровой двойник как инструмент анализа энергоэффективности.
- 40) Границы применимости цифровых двойников в теоретической и прикладной теплотехнике.
- 41) Примеры применения численного моделирования в диссертационных исследованиях по специальности 2.4.6.
- 42) Связь расчетной модели или цифрового двойника с паспортом научной специальности 2.4.6.

7.1.2. Примерные расчетно-аналитические задания

• **Физико-математическая постановка задачи тепломассопереноса.**

Сформулировать физическую и математическую постановку задачи тепломассопереноса для выбранной теплотехнической системы: определить объект, расчетную область, параметры, уравнения, допущения, начальные и граничные условия.

• **Нестационарная теплопроводность в плоской стенке, цилиндре или сферическом теле.**

Сформулировать задачу нестационарной теплопроводности, выбрать граничные условия, записать расчетную схему и указать контролируемые выходные параметры.

• **Конечно-разностная схема для одномерной задачи теплопроводности.**

Построить конечно-разностную схему для одномерной задачи теплопроводности с граничными условиями первого, второго или третьего рода.

• **Анализ устойчивости явной расчетной схемы.**

Для явной схемы решения задачи теплопроводности определить условие устойчивости, объяснить физический смысл ограничения на шаг по времени и пространству.

• **Сравнение явной и неявной расчетных схем.**

Сравнить явную и неявную схемы по устойчивости, трудоемкости, точности, удобству реализации и области применения.

• **Анализ влияния шага по времени и пространству.**

Выполнить расчетную оценку влияния шага по времени и пространству на результат моделирования теплопереноса. Сформулировать вывод о сеточной независимости.

• **Проверка теплового баланса расчетной модели.**

Составить тепловой баланс расчетной области, определить входящие и выходящие тепловые потоки, источники теплоты и возможные причины невязки.

• **Сопряженный теплообмен.**

Сформулировать задачу сопряженного теплообмена для системы «твердое тело – поток теплоносителя». Указать условия сопряжения на границе сред.

• **Конвективный тепломассоперенос в канале или трубопроводе.**

Разработать расчетную постановку задачи конвективного теплообмена в канале или трубопроводе, указать входные параметры, граничные условия и выходные показатели.

• **Моделирование теплообменного аппарата.**

Сформулировать расчетную схему теплообменного аппарата, определить основные балансовые соотношения, критерии корректности расчета и способы верификации.

• **Моделирование теплового режима скважины, трубопровода или резервуара.**

Разработать расчетную схему теплового режима выбранного объекта с учетом теплофизических свойств, условий теплообмена и режима эксплуатации.

• **Моделирование тепломассопереноса в пористой среде.**

Сформулировать задачу тепломассопереноса в пористой среде, указать уравнения переноса, параметры пористой среды, флюида, начальные и граничные условия.

• **Моделирование фазового перехода.**

Сформулировать задачу тепломассопереноса с фазовым переходом, определить роль скрытой теплоты, источников члена и изменения теплофизических свойств.

• **Верификация расчетной модели.**

Для выбранной расчетной модели предложить способ верификации: сравнение с аналитическим решением, эталонной задачей, независимым расчетом или балансовой проверкой.

• **Валидация расчетной модели.**

Предложить способ валидации модели на основе экспериментальных, эксплуатационных или литературных данных. Указать критерии соответствия расчетных и измеренных результатов.

• **Анализ чувствительности модели.**

Для выбранной теплотехнической модели определить ключевые входные параметры и оценить влияние их изменения на выходные показатели.

• **Концепция цифрового двойника теплотехнической системы.**

Предложить структуру цифрового двойника выбранной теплотехнической системы: объект, физическая модель, входные данные, расчетные сценарии, выходные показатели, способы верификации, ограничения применимости.

• **Фрагмент расчетного раздела диссертационного исследования.**

Сформулировать расчетный фрагмент диссертационного исследования: цель моделирования, объект, уравнения, допущения, граничные условия, алгоритм решения, ожидаемые результаты и связь с паспортом 2.4.6.

7.1.3. Примерные темы аналитических обзоров, докладов и презентаций

- 1) Современные подходы к численному моделированию тепломассопереноса.
- 2) Физико-математическая постановка задач вычислительной теплофизики.
- 3) Метод конечных разностей в задачах прикладной теплотехники.
- 4) Метод конечных объемов в задачах конвективного теплообмена.
- 5) Метод конечных элементов в задачах теплопереноса.
- 6) Численное моделирование нестационарной теплопроводности.
- 7) Моделирование сопряженного теплообмена в теплообменных аппаратах.
- 8) Численное моделирование теплового режима трубопроводных систем.
- 9) Численное моделирование тепломассопереноса в скважинах.
- 10) Численное моделирование тепломассопереноса в пористых средах.
- 11) Моделирование неизотермической фильтрации.
- 12) Моделирование фазовых превращений в теплотехнических системах.
- 13) Верификация и валидация расчетных моделей тепломассопереноса.
- 14) Анализ чувствительности и неопределенности в вычислительной теплофизике.
- 15) Сеточная независимость и контроль численной погрешности.
- 16) Цифровые двойники теплотехнических систем: современное состояние и перспективы.
- 17) Цифровые двойники теплообменных аппаратов.
- 18) Цифровые двойники систем теплоснабжения.
- 19) Цифровые двойники нефтегазовых теплотехнических объектов.
- 20) Цифровые двойники в задачах энергоэффективности и тепловой безопасности.
- 21) Модели пониженного порядка в цифровых двойниках теплотехнических систем.

- 22) Суррогатные модели в задачах тепломассопереноса.
- 23) Физически-информированное машинное обучение в задачах тепломассопереноса.
- 24) Преимущества и ограничения подходов на основе данных в инженерной теплотехнике.
- 25) Связь цифрового двойника с темой диссертационного исследования аспиранта.

7.2. Критерии оценки результатов кандидатского экзамена

Оценка	Критерии
Отлично	Аспирант демонстрирует глубокое и системное понимание физических механизмов тепломассопереноса и принципов численного моделирования; грамотно использует терминологию вычислительной теплофизики; корректно формулирует физическую, математическую и численную постановку задачи; обоснованно выбирает расчетную область, параметры, уравнения, допущения, начальные и граничные условия; способен объяснить устойчивость, сходимость, погрешность, сеточную независимость, верификацию и валидацию модели; предлагает научно обоснованную структуру расчетного цифрового двойника теплотехнической системы; связывает содержание дисциплины с темой диссертационного исследования и паспортом 2.4.6.
Хорошо	Аспирант в целом правильно раскрывает содержание дисциплины, владеет основными численными методами и понятиями цифрового моделирования, способен выполнить типовую расчетную постановку и интерпретировать результаты, но допускает отдельные неточности в анализе устойчивости, верификации, валидации, выборе допущений, расчетных параметров или границ применимости модели.
Удовлетворительно	Аспирант владеет базовой терминологией и общими представлениями о численном моделировании тепломассопереноса, но испытывает затруднения при самостоятельной постановке задачи, выборе расчетной схемы, обосновании параметров модели, анализе корректности расчетных результатов и формировании структуры цифрового двойника.
Неудовлетворительно	Аспирант не владеет основными понятиями дисциплины; не способен сформулировать физическую и численную постановку задачи тепломассопереноса; допускает грубые ошибки в использовании терминологии, расчетных схем и физических законов; не может связать содержание дисциплины с направлением диссертационного исследования.

7.3. Рекомендуемая структура ответа на дифференцированном зачете

При ответе на вопрос дифференцированного зачета аспиранту рекомендуется придерживаться следующей структуры:

- 1) дать определение рассматриваемого понятия, метода, модели или процесса;
- 2) раскрыть физический смысл рассматриваемого процесса;
- 3) указать объект или класс объектов, для которых применяется модель;
- 4) сформулировать физическую постановку задачи;
- 5) записать основные уравнения или расчетные соотношения;
- 6) пояснить используемые параметры и размерности;
- 7) указать начальные и граничные условия;
- 8) обосновать исходные допущения;
- 9) пояснить численный метод или расчетную схему;
- 10) указать критерии корректности расчета;
- 11) раскрыть способы верификации, валидации или анализа чувствительности;

- 12) пояснить ограничения модели;
- 13) привести пример прикладного использования;
- 14) показать связь с научной специальностью 2.4.6;
- 15) при возможности показать связь с темой собственного диссертационного исследования.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература представлена преимущественно электронными изданиями, доступными обучающимся через электронные библиотечные системы и электронную информационно-образовательную среду университета.

8.1. Основная литература:

1) Нефтегазовые технологии: физико-математическое моделирование течений : учебное пособие для вузов / под ред. А. Б. Шабарова. – Москва : Издательство Юрайт ; Тюмень : Тюменский государственный университет, 2022. – 215 с. – ISBN 978-5-534-03665-7 ; ISBN 978-5-400-00944-0. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт. – URL: <https://urait.ru/bcode/498906> (дата обращения: 18.05.2026). – Режим доступа: по подписке ТюмГУ.

2) Теория теплопереноса в нефтегазовых и строительных технологиях : учебное пособие для вузов / под ред. А. Б. Шабарова, А. А. Кислицына. – Москва : Издательство Юрайт ; Тюмень : Тюменский государственный университет, 2022. – 332 с. – ISBN 978-5-534-03562-9 ; ISBN 978-5-400-00979-2. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт. – URL: <https://urait.ru/bcode/498905> (дата обращения: 18.05.2026). – Режим доступа: по подписке ТюмГУ.

8.2. Дополнительная литература:

1) Шабаров, Александр Борисович. Гидрогазодинамика: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Теплофизика" направления подготовки "Техническая физика" / А. Б. Шабаров; рец.: А. А. Кислицын, В. Г. Свиридов; Тюм. гос. ун-т, Ин-т математики, естеств. наук и информ. технологий. – 2-е изд., перераб. – Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2013. – 2-Лицензионный договор №228/2016-03-02. – Доступ по паролю из сети Интернет (чтение). – URL: https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_228_Gidrogazodinamika_UP_2013.pdf (дата обращения: 21.05.2026).

2) Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2026. – 533 с. – ISBN 978-5-534-19758-7. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт. – URL: <https://urait.ru/bcode/582626> (дата обращения: 18.05.2026). – Режим доступа: по подписке ТюмГУ.

3) Мусакаев, Н. Г. Механика многофазных сред: течения газожидкостных смесей в каналах : учебник для вузов / Н. Г. Мусакаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 148 с. – ISBN 978-5-534-12445-3. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт. – URL: <https://urait.ru/bcode/566841> (дата обращения: 18.05.2026). – Режим доступа: по подписке ТюмГУ.

4) Шкляр, М. Ф. Основы научных исследований : учебное пособие / М. Ф. Шкляр. – 9-е изд. – Москва : Дашков и К°, 2022. – 208 с. – ISBN 978-5-394-04708-4. – Текст : электронный // Znanium. – URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=431702> (дата обращения: 18.05.2026). – Режим доступа: по подписке ТюмГУ.

8.3. Интернет-ресурсы:

1) Электронная информационно-образовательная среда ТюмГУ. – URL: <https://lms.utmn.ru/>

2) Официальный сайт ТюмГУ. – URL: <https://www.utmn.ru/>

3) Официальный сайт ТюмГУ. Сведения об образовательной организации. Образование. – URL: <https://www.utmn.ru/sveden/education/>

4) Библиотека ТюмГУ. – URL: <https://lib.utmn.ru/>

5) Инструкция Библиотеки ТюмГУ по удаленному доступу к электронным ресурсам через FEDURUS. – URL: <https://lib.utmn.ru/ru/fedurus>

6) Правила оформления списка литературы в рабочих программах дисциплин ТюмГУ. – URL: <https://lib.utmn.ru/tpost/6fugva4011-pravila-oformleniya-spiska-literaturi-v>

7) Образовательная платформа Юрайт. – URL: <https://urait.ru/>

- 8) Электронно-библиотечная система Znanium. – URL: <https://znanium.ru/>
 - 9) Электронно-библиотечная система «Лань». – URL: <https://e.lanbook.com/>
 - 10) Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU. – URL: <https://www.elibrary.ru/>
 - 11) Национальная электронная библиотека. – URL: <https://rusneb.ru/>
 - 12) Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/>
 - 13) Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. – URL: <https://minobrnauki.gov.ru/>
 - 14) Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. – URL: <https://vak.gisnauka.ru/>
 - 15) Государственная информационная система научной аттестации. – URL: <https://vak.gisnauka.ru/>
 - 16) Российский индекс научного цитирования. – URL: <https://www.elibrary.ru/>
 - 17) Scopus. – URL: <https://www.scopus.com/>
- Используется при наличии доступа через подписку ТюмГУ для библиографического поиска, анализа публикационной активности, подбора научных источников и подготовки аналитического обзора по теме диссертационного исследования.
- 18) Web of Science. – URL: <https://www.webofscience.com/>
- Используется при наличии доступа через подписку ТюмГУ для поиска и анализа научных публикаций по тематике численного моделирования, цифровых двойников, вычислительной теплофизики, тепломассопереноса и теплотехнических систем.
- 19) SpringerLink. – URL: <https://link.springer.com/>
- Используется при наличии доступа через подписку ТюмГУ для поиска современных научных публикаций и монографий по численному моделированию, вычислительной теплофизике, тепломассопереносу, многофазным течениям, пористым средам и цифровым двойникам теплотехнических систем.
- 20) Wiley Online Library. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/>
- Используется при наличии доступа через подписку ТюмГУ для поиска современных научных публикаций по численным методам, теплопередаче, вычислительной гидродинамике, тепломассопереносу, многофазным потокам и теплотехническим приложениям.
- 21) Открытая документация GNU Octave. – URL: <https://docs.octave.org/>
 - 22) Открытая документация Python. – URL: <https://docs.python.org/>
 - 23) Открытая документация NumPy. – URL: <https://numpy.org/doc/>
 - 24) Открытая документация SciPy. – URL: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/>
 - 25) Открытая документация Matplotlib. – URL: <https://matplotlib.org/stable/>
 - 26) Открытая документация OpenFOAM. – URL: <https://www.openfoam.com/documentation/>
 - 27) Открытая документация ParaView. – URL: <https://docs.paraview.org/>
 - 28) Открытая документация LibreOffice. – URL: <https://documentation.libreoffice.org/>
 - 29) Открытая документация Zotero. – URL: <https://www.zotero.org/support/>

9. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю)

При реализации дисциплины используется лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе отечественного производства: Яндекс.Мессенджер, Яндекс.Телемост и Яндекс.Диск, антивирусное ПО Kaspersky; FAR Manager, офисный пакет Р7-Офис.

10. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Для реализации дисциплины используются учебные аудитории, в которых обеспечены проводное подключение ПК к локальной сети и сети Интернет, а также доступ к электронно-библиотечным системам, электронной информационно-образовательной среде, современным профессиональным базам данных и информационно-справочным системам:

Мультиформатная учебная аудитория для проведения лекционных занятий.

Основное оборудование:

- Столы – 76 шт.
- Стулья – 123 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 4 шт.
- Двухсторонняя мобильная стеклянная маркерная доска на металлических ножках – 1 шт.
- Двухсторонняя мобильная доска на металлическом основании – 1 шт.
- Технические средства обучения: Интерактивная панель – 1 шт.
- Лазерный проектор – 2 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 2 шт.
- ТВ-панель настенная – 2 шт.
- Потолочный микрофонный массив – 2 шт.
- PTZ-камера с автотрекингом – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК в комплекте с монитором – 1 шт.
- Мультимедийная трибуна – 1 шт.
- Сенсорный монитор – 1 шт.
- Настольный микрофон – 1 шт.
- Панель управления аудиторией – 1 шт.
- Система коммутация аудио и видеосигнала – 1 шт.

Мультимедийная учебная аудитория для проведения практических и семинарских занятий.

Основное оборудование:

- Столы – 15 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя - 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 1 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 1 шт.

Компьютерный класс (используется для практических занятий, численного моделирования, обработки и визуализации данных, подготовки научных материалов).

Основное оборудование:

- Столы – 30 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 2 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 31 шт.

Помещение для самостоятельной работы.

Основное оборудование:

- Столы – 15 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 2 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.

- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 1 шт.

Помещение для самостоятельной работы (коворкинг используется как помещение для самостоятельной работы аспирантов, подготовки публикаций, докладов, отчетов, презентаций и материалов диссертации).

Основное оборудование:

- Столы – 22 шт.
- Кресла – 22 шт.
- Технические средства обучения: ПК типа «моноблок» – 10 шт.

Кабинет для проведения групповых и индивидуальных консультаций.

Основное оборудование:

- Столы – 15 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 2 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 1 шт.

Кабинет для проведения промежуточной и итоговой аттестации.

Основное оборудование:

- Столы – 15 шт.
- Стулья – 30 шт.
- Рабочее место преподавателя – 1 шт.
- Магнитно-маркерная стеклянная доска (настенная) – 1 шт.
- Технические средства обучения: Лазерный проектор – 1 шт.
- Проекционный моторизованный экран – 1 шт.
- Акустическая система – 1 шт.
- ПК типа «моноблок» – 1 шт.

11. Средства адаптации преподавания дисциплины (модуля) к потребностям лиц с ограниченными возможностями

В случае необходимости обучающимся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья (по заявлению обучающегося) могут предлагаться одни из следующих вариантов восприятия информации с учетом их индивидуальных психофизических особенностей, в том числе с применением электронного обучения и дистанционных технологий:

- для лиц с нарушениями зрения: в печатной форме увеличенным шрифтом; в форме электронного документа; в форме аудиофайла (перевод учебных материалов в аудиоформат); индивидуальные задания и консультации;
- для лиц с нарушениями слуха: в печатной форме; в форме электронного документа; индивидуальные задания и консультации;
- для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата: в печатной форме; в форме электронного документа; в форме аудиофайла; индивидуальные задания и консультации.

При необходимости могут предусматриваться увеличение времени на подготовку ответа при промежуточной аттестации, индивидуальный график консультаций, применение дистанционных образовательных технологий, электронных образовательных ресурсов и ассистивной помощи в порядке, установленном локальными нормативными актами ТюмГУ.

12. Методические рекомендации обучающимся по выполнению самостоятельной работы

12.1. Методические рекомендации по освоению дисциплины

1) Рассматривать дисциплину как инструмент углубленного освоения научных задач численного моделирования процессов теплопереноса и как основу расчетного обоснования соответствующих разделов диссертационного исследования.

2) При изучении каждого раздела фиксировать связь рассматриваемых моделей, расчетных схем и цифровых двойников с паспортом научной специальности 2.4.6.

3) Не ограничиваться формальным воспроизведением алгоритма или программной реализации, а раскрывать физический смысл процессов, роль параметров, область применимости моделей, исходные допущения и ограничения расчетных зависимостей.

4) При выполнении самостоятельных работ использовать учебную литературу, современные научные статьи за последние 5 лет и, при необходимости, данные лабораторных, расчетных или эксплуатационных исследований.

5) При анализе темы диссертации выделять объект исследования, физические процессы, математическую и численную постановку, расчетную модель, измеряемые и рассчитываемые параметры, ожидаемую научную новизну и соответствие паспорту специальности.

6) Не подменять задачи теоретической и прикладной теплотехники задачами автоматизированного управления, создания приборов или первичных преобразователей, если в работе отсутствует выраженная теплотехническая и физико-математическая постановка задачи.

12.2. Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям

К каждому практическому или семинарскому занятию аспиранту рекомендуется заранее изучить соответствующий раздел лекционного материала, проработать базовые определения, уравнения и расчетные схемы, подготовить примеры применения рассматриваемых моделей и выписать вопросы, требующие обсуждения. При выполнении расчетных заданий необходимо явно формулировать физическую, математическую и численную постановку задачи, исходные допущения, область применимости выбранной модели, размерности величин, критерии корректности расчета и интерпретацию результата.

12.3. Методические рекомендации по подготовке к дифференцированному зачету

Подготовка к дифференцированному зачету должна включать систематическое повторение разделов, связанных с физико-математическим моделированием, численными методами решения задач теплопроводности, конвекции и теплопереноса, сопряженным и многофазным теплопереносом, моделированием пористых сред, верификацией, валидацией, анализом чувствительности и построением расчетных цифровых двойников теплотехнических систем. Ответ на зачете должен быть логичным, физически содержательным и связанным с темой диссертационного исследования аспиранта.

При подготовке к зачету рекомендуется использовать следующую структуру ответа: определение понятия, метода, модели или процесса; физический смысл; объект или класс объектов; физическая постановка задачи; основные уравнения; параметры и размерности; начальные и граничные условия; допущения; численный метод или расчетная схема; критерии корректности расчета; способы верификации, валидации или анализа чувствительности; ограничения модели; прикладной пример; связь с паспортом 2.4.6; связь с темой диссертационного исследования.

12.4. Методические рекомендации по оформлению самостоятельных работ

Самостоятельные работы оформляются в виде расчетно-аналитического задания, аналитического обзора, концепции цифрового двойника или итогового доклада (презентации). В работе должны быть указаны тема, цель, объект и предмет рассмотрения, исходные данные или исследовательская проблема, используемые методы, физическая, математическая и расчетная постановка, основные результаты, выводы и список использованных источников. При использовании результатов научных публикаций обязательны корректные ссылки на источники.