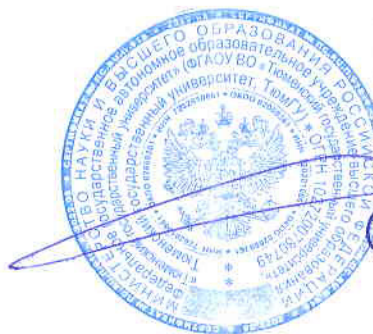


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



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

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**
Научная специальность 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

1. Паспорт оценочных материалов по дисциплине

Оценочные материалы по дисциплине «Численное моделирование и цифровые двойники процессов тепломассопереноса в теплотехнических системах» предназначены для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации аспирантов, обучающихся по программе подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Оценочные материалы обеспечивают проверку уровня освоения аспирантами углубленных теоретических положений, расчетно-аналитических и исследовательских подходов к построению, численной реализации, верификации, валидации и применению физико-математических моделей тепломассопереноса, а также к разработке расчетных цифровых двойников теплотехнических систем для анализа, прогноза и оптимизации их тепловых режимов.

Настоящие оценочные материалы являются приложением к рабочей программе дисциплины. Они используются при проведении текущего контроля, самостоятельной работы аспиранта и промежуточной аттестации в форме дифференцированного зачета. Оценочные материалы не заменяют отдельный комплект заданий для промежуточной аттестации; примерные вопросы и задания используются как банк материалов для подготовки аспирантов и формирования индивидуальных вариантов контроля.

1.1. Компетенции, проверяемые оценочными материалами

Оценочные материалы соотнесены с профессиональными компетенциями, формируемыми при освоении дисциплины.

Код	Содержание компетенции
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
ПК-2	способность применять расчетные, экспериментальные, расчетно-экспериментальные, численные и информационные методы исследования термодинамических, теплогидравлических и тепломассопереносных процессов в теплотехнических системах, одно- и многофазных, пористых, флюидонасыщенных и мерзлых средах, включая обработку, верификацию, валидацию и интерпретацию полученных результатов
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

1.2. Паспорт оценочных материалов

В таблице указаны темы дисциплины и вид промежуточной аттестации в соответствии с рабочей программой. В целях компактности в графе «Код и содержание компетенции» приведены коды компетенций; полное содержание компетенций приведено в пункте 1.1 настоящих оценочных материалов.

№ п/п	Темы дисциплины (модуля) в ходе текущего контроля, вид промежуточной аттестации	Код и содержание компетенции	Оценочные материалы (виды и количество)
1.	Физико-математическое моделирование процессов тепломассопереноса	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Участие в семинарских занятиях и научных обсуждениях; расчетно-аналитическое задание; вопросы

			для текущего контроля и дифференцированного зачета
2.	Численные методы решения задач теплопроводности, конвекции и массопереноса	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Расчетно-аналитическое задание; устное собеседование; вопросы для текущего контроля и дифференцированного зачета
3.	Моделирование сопряженного, многофазного теплообмена и теплообмена в пористых средах	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Расчетно-аналитическое задание; аналитический обзор; итоговый доклад (презентация); вопросы для текущего контроля и дифференцированного зачета
4.	Верификация, валидация, анализ чувствительности и неопределенности расчетных моделей	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Расчетно-аналитическое задание; аналитический обзор; устное собеседование; вопросы для текущего контроля и дифференцированного зачета
5.	Цифровые двойники теплотехнических систем: структура, данные, модели и расчетные сценарии	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Концепция цифрового двойника; аналитический обзор; итоговый доклад (презентация); расчетно-аналитическое задание
6.	Прикладные расчетные задачи теплотехнических, нефтегазовых и энергетических систем	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Расчетно-аналитическое задание; концепция цифрового двойника; итоговый доклад (презентация); интерпретация расчетных, экспериментальных или литературных данных
7.	Дифференцированный зачет, 4 семестр	ПК-1, ПК-2, ПК-3	Устное собеседование по вопросам дисциплины с учетом выполненных работ текущего контроля

2. Виды и характеристика оценочных средств

Для оценки результатов освоения дисциплины используются следующие оценочные средства:

- 1) участие в семинарских занятиях и научных обсуждениях;
- 2) расчетно-аналитическое задание;
- 3) аналитический обзор современной научной литературы;
- 4) концепция цифрового двойника теплотехнической системы или процесса;
- 5) итоговый доклад (презентация) по тематике дисциплины;
- 6) дифференцированный зачет.

2.1. Участие в семинарских занятиях и научных обсуждениях

Участие в семинарских занятиях и научных обсуждениях используется для проверки теоретической подготовки аспиранта, владения профессиональной терминологией, понимания физических механизмов теплообмена и способности аргументированно обсуждать расчетные, численные, экспериментальные и прикладные задачи дисциплины.

В ходе семинарских занятий оцениваются:

- 1) знание основных понятий дисциплины;
- 2) корректность использования терминов вычислительной теплофизики, численного моделирования и цифровых двойников;
- 3) способность объяснять физический смысл расчетной модели;

- 4) способность различать физическую, математическую, численную, имитационную и цифровую модели;
- 5) умение обосновывать выбор расчетной области, параметров, уравнений и граничных условий;
- 6) способность обсуждать устойчивость, сходимость, погрешность и сеточную независимость;
- 7) умение связывать обсуждаемый материал с темой диссертационного исследования и паспортом 2.4.6.

2.2. Расчетно-аналитическое задание

Расчетно-аналитическое задание используется для проверки способности аспиранта применять теоретические положения дисциплины к постановке и решению задач численного моделирования процессов тепломассопереноса.

Расчетно-аналитическое задание должно включать:

- 1) формулировку задачи;
- 2) описание объекта моделирования;
- 3) физическую постановку задачи;
- 4) математическую постановку задачи;
- 5) выбор расчетной области;
- 6) выбор переменных, параметров и теплофизических свойств;
- 7) запись основных уравнений;
- 8) указание начальных и граничных условий;
- 9) обоснование допущений;
- 10) выбор численного метода или расчетной схемы;
- 11) описание алгоритма решения;
- 12) проверку размерностей и физических ограничений;
- 13) анализ устойчивости, сходимости или сеточной независимости при необходимости;
- 14) проверку баланса массы и / или энергии;
- 15) интерпретацию результата;
- 16) вывод;

17) указание связи задачи с паспортом научной специальности 2.4.6.

2.3. Аналитический обзор современной научной литературы

Аналитический обзор современной научной литературы используется для проверки способности аспиранта критически анализировать современные публикации по численному моделированию тепломассопереноса, вычислительной теплофизике, цифровым двойникам, верификации и валидации расчетных моделей.

Обзор должен быть связан с темой диссертационного исследования аспиранта или с одним из разделов дисциплины.

Рекомендуемая структура аналитического обзора:

- 1) тема обзора;
- 2) связь темы с дисциплиной и паспортом 2.4.6;
- 3) актуальность научной проблемы;
- 4) характеристика объекта или класса объектов моделирования;
- 5) анализ не менее 10 научных источников, включая публикации последних 5 лет;
- 6) классификация моделей, численных методов, расчетных схем или цифровых двойников;
- 7) сопоставление результатов, представленных в литературе;
- 8) анализ подходов к верификации и валидации;
- 9) анализ неопределенности и ограничений существующих моделей;
- 10) определение нерешенных вопросов;
- 11) связь выявленной научной проблемы с темой диссертации;
- 12) вывод о перспективности дальнейшего исследования.

2.4. Концепция цифрового двойника теплотехнической системы или процесса

Концепция цифрового двойника используется для проверки способности аспиранта предложить структуру расчетной цифровой модели теплотехнического объекта, основанной на физико-математической постановке, расчетных алгоритмах, данных измерений или эксплуатации и процедурах верификации.

Концепция цифрового двойника должна включать:

- 1) название объекта или процесса;
- 2) назначение цифрового двойника;
- 3) границы объекта моделирования;
- 4) перечень входных параметров;
- 5) перечень выходных показателей;
- 6) физические процессы, подлежащие моделированию;
- 7) физико-математическую модель;
- 8) расчетную модель или численный алгоритм;
- 9) источники данных: экспериментальные, эксплуатационные, литературные или расчетные;
- 10) расчетные сценарии;
- 11) способы верификации и валидации;
- 12) способы визуализации и интерпретации результатов;
- 13) ограничения применимости;
- 14) связь с диссертационным исследованием аспиранта;
- 15) связь с паспортом научной специальности 2.4.6.

2.5. Итоговый доклад (презентация)

Итоговый доклад (презентация) используется для проверки способности аспиранта систематизировать теоретический материал, анализировать научную литературу, формулировать расчетную постановку и представлять результаты в научной форме.

Доклад должен быть связан с одним из разделов дисциплины и, по возможности, с темой диссертационного исследования аспиранта.

Рекомендуемая структура доклада:

- 1) название темы;
- 2) актуальность выбранной проблемы;
- 3) связь темы с научной специальностью 2.4.6;
- 4) объект и предмет моделирования;
- 5) физическая постановка задачи;
- 6) математическая постановка задачи;
- 7) численная постановка или алгоритм;
- 8) данные, параметры и граничные условия;
- 9) результаты расчетов или ожидаемые результаты;
- 10) верификация, валидация или анализ ограничений;
- 11) связь с темой диссертационного исследования;
- 12) выводы.

2.6. Дифференцированный зачет

Дифференцированный зачет проводится в форме устного собеседования по вопросам дисциплины с учетом выполненных аспирантом работ текущего контроля.

На дифференцированном зачете оцениваются:

- 1) знание теоретических основ дисциплины;
- 2) понимание физических механизмов тепломассопереноса;
- 3) способность формулировать физическую, математическую и численную постановку задачи;
- 4) умение выбирать расчетную схему, параметры, начальные и граничные условия;

- 5) способность объяснять устойчивость, сходимость, погрешность и сеточную независимость;
- 6) понимание процедур верификации и валидации расчетных моделей;
- 7) способность предложить структуру цифрового двойника теплотехнической системы;
- 8) способность связывать содержание дисциплины с темой диссертации и паспортом 2.4.6.

2.7. Распределение баллов текущего контроля

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

2.8. Шкала оценивания текущего контроля

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.

2.9. Критерии оценивания текущего контроля

2.9.1. Участие в семинарских занятиях и научных обсуждениях – до 15 баллов

Баллы	Критерии
13–15	Аспирант регулярно и содержательно участвует в обсуждениях, корректно использует терминологию вычислительной теплофизики, демонстрирует понимание физических механизмов тепломассопереноса, аргументированно отвечает на вопросы, связывает обсуждаемые темы с паспортом 2.4.6 и темой диссертационного исследования.
10–12	Аспирант участвует в обсуждениях, в целом корректно использует терминологию и демонстрирует понимание основных положений дисциплины, но отдельные ответы недостаточно глубоки или требуют уточнения.
6–9	Участие нерегулярное или преимущественно формальное; аспирант демонстрирует фрагментарное понимание обсуждаемых вопросов, допускает отдельные терминологические или содержательные неточности.
0–5	Аспирант практически не участвует в обсуждениях или допускает грубые ошибки в базовых понятиях, физических законах, расчетных схемах и терминологии дисциплины.

2.9.2. Расчетно-аналитическое задание – до 25 баллов

Баллы	Критерии
22–25	Задание выполнено корректно; физическая, математическая и численная постановки обоснованы; расчетная область, параметры, уравнения, начальные и граничные

	условия выбраны верно; расчетная схема описана корректно; выполнена проверка физической реалистичности результата; показана связь задачи с паспортом 2.4.6.
18–21	Задание выполнено в целом правильно; имеются отдельные неточности в расчетах, обосновании допущений, записи уравнений, выборе параметров, расчетной схеме или интерпретации результата.
12–17	Работа выполнена частично; расчетная схема выбрана недостаточно обоснованно; имеются ошибки в уравнениях, размерностях, начальных или граничных условиях, но общий подход к постановке и решению задачи прослеживается.
0–11	Задание не выполнено или выполнено неверно; физическая или численная модель выбрана неправильно; допущены грубые ошибки в физических законах, расчетах, размерностях или интерпретации результата.

2.9.3. Аналитический обзор современной научной литературы – до 20 баллов

Баллы	Критерии
18–20	Обзор выполнен системно и критически; использованы современные научные источники; показано состояние исследований, сопоставлены модели и методы, выявлены ограничения существующих подходов, сформулирована исследовательская ниша, показана связь с темой диссертации и паспортом 2.4.6.
14–17	Обзор в целом соответствует теме, содержит современные источники и анализ подходов, но отдельные ограничения моделей, противоречия, нерешенные вопросы или перспективы раскрыты недостаточно.
9–13	Обзор носит преимущественно реферативный характер; анализ источников ограничен; связь с темой диссертации и паспортом 2.4.6 показана неполно.
0–8	Обзор не соответствует теме, содержит нерелевантные источники, не отражает современное состояние научной проблемы или не представлен.

2.9.4. Концепция цифрового двойника теплотехнической системы или процесса

Баллы	Критерии
18–20	Концепция цифрового двойника разработана полно и научно обоснованно; корректно определены объект, границы модели, входные параметры, выходные показатели, физико-математическая модель, расчетные сценарии, данные, способы верификации и ограничения применимости; показана связь с темой диссертации и паспортом 2.4.6.
14–17	Концепция в целом соответствует заданию, но отдельные элементы требуют уточнения: границы модели, набор параметров, расчетные сценарии, источники данных, верификация или ограничения применимости.
9–13	Концепция носит преимущественно описательный характер; цифровой двойник представлен как общая схема без достаточной физико-математической и расчетной основы; связь с 2.4.6 показана неполно.
0–8	Концепция не соответствует тематике дисциплины, не содержит физико-математической основы, подменяет цифровой двойник общей информационной системой или не представлена.

2.9.5. Итоговый доклад (презентация) – до 20 баллов

Баллы	Критерии
18–20	Доклад логичен, содержателен и выполнен на высоком научном уровне; раскрыты физическая, математическая и расчетная постановки задачи; показаны модели, параметры, методы исследования и ограничения; презентация оформлена корректно; аспирант уверенно отвечает на вопросы и связывает тему с диссертационным исследованием.

14–17	Доклад в целом раскрывает тему, но имеются отдельные замечания к глубине анализа, структуре, подбору источников, визуализации, обоснованию моделей или ответам на вопросы.
9–13	Доклад преимущественно описательный, недостаточно структурирован, слабо раскрывает расчетную постановку задачи, содержит ограниченный анализ источников или неполную связь с темой диссертации.
0–8	Доклад не соответствует тематике дисциплины, не раскрывает содержание выбранного раздела, содержит существенные терминологические или физические ошибки либо не представлен.

2.10. 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.

2.11. 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.

3. Оценочные средства

3.1. 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.

3.2. 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 тепломассопереноса. 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, источникового 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.

3.3. 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.

3.4. Задание на разработку концепции расчетно-экспериментального исследования

Аспиранту необходимо подготовить концепцию расчетного цифрового двойника теплотехнической системы или процесса. Концепция должна быть связана с темой диссертационного исследования аспиранта или с одним из разделов дисциплины и должна показывать принадлежность выбранной задачи к научной специальности 2.4.6.

В рамках дисциплины цифровой двойник рассматривается как расчетно-аналитическая и информационная модель теплотехнического объекта, основанная на физических закономерностях тепломассопереноса, расчетных алгоритмах, экспериментальных или эксплуатационных данных и процедурах проверки корректности, а не как общая информационная система или система автоматизированного управления.

Рекомендуемая форма таблицы:

Элемент концепции	Формулировка по теме исследования	Обоснование и ожидаемый результат
Объект или процесс моделирования		
Назначение цифрового двойника		
Границы объекта моделирования		
Входные параметры		
Выходные показатели		
Физические процессы, подлежащие моделированию		
Физико-математическая модель		
Расчетная модель или численный алгоритм		
Источники данных		
Расчетные сценарии		
Способы верификации и валидации		
Способы визуализации и интерпретации результатов		
Ограничения применимости		
Связь с темой диссертации		

3.6. 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.