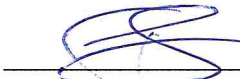


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Механико-математический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан

 Л. В. Гензе

«28» декабря 2023 г.

Рабочая программа дисциплины
Цифровые двойники в инженерных задачах

по группе направлений бакалавриата и магистратуры

01 - МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА, 02- КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
НАУКИ, 03 – ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ, 08 – ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ
СТРОИТЕЛЬСТВА, 09 – ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, 12 -
ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ, 13 – ЭЛЕКТРО-И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 14 – ЯДЕРНАЯ
ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНОЛОГИИ, 15 – МАШИНОСТРОЕНИЕ, 16 – ФИЗИКО-
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, 17 - ОРУЖИЕ И СИСТЕМЫ ВООРУЖЕНИЯ,
21 - ПРИКЛАДНАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ ДЕЛО, НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО И ГЕОДЕЗИЯ, 22-
ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ, 23 - ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ НАЗЕМНОГО
ТРАНСПОРТА, 24 – АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА, 26 -
ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Форма обучения: Очная

СОГЛАСОВАНО:

Председатель УМК

 Е.А. Тарасов

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих универсальных компетенций:

Наименование категории (группы) универсальных компетенций	Код и наименование универсальной компетенции выпускника
Системное и критическое мышление	УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.
Разработка и реализация проектов	УК-2. Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений.

В результате освоения дисциплины у слушателей также должны быть сформированы следующие общепрофессиональные компетенции:

Код в УГН	Компетенция	Расшифровка
01.03.02 Прикладная математика и информатика ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-5	ОПК-1 ОПК-2 ОПК-3 ОПК-5	ОПК-1. Способен применять фундаментальные знания, полученные в области математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности. ОПК-2. Способен использовать и адаптировать существующие математические методы и системы программирования для разработки и реализации алгоритмов решения прикладных задач. ОПК-3. Способен применять и модифицировать математические модели для решения задач в области профессиональной деятельности. ОПК-5. Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения.
02.03.03 Математическое обеспечение и администрирование информационных систем ОПК-1		
02.03.02 Фундаментальная информатика и информационные технологии ОПК-1		
01.03.03 Механика и математическое моделирование ОПК-1, ОПК-2	ОПК-1 ОПК-2	ОПК-1. Способен использовать фундаментальные знания, полученные в области математических и естественных наук, в профессиональной деятельности. ОПК-2. Способен применять методы математического и алгоритмического моделирования, современный

		математический аппарат в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности.
01.03.04 Прикладная математика ОПК-1, ОПК-2	ОПК-1 ОПК-2	<p>ОПК-1. Способен применять знание фундаментальной математики и естественно-научных дисциплин при решении задач в области естественных наук и инженерной практике.</p> <p>ОПК-2. Способен обоснованно выбирать, дорабатывать и применять для решения исследовательских и проектных задач математические методы и модели, осуществлять проверку адекватности моделей, анализировать результаты, оценивать надежность и качество функционирования систем.</p>
02.03.01 Математика и компьютерные науки ОПК-4	ОПК-4	ОПК-4. Способен находить, анализировать, реализовывать программно и использовать на практике математические алгоритмы, в том числе с применением современных вычислительных систем.
03.03.01 Прикладные математика и физика ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4	ОПК-1 ОПК-3 ОПК-4	<p>ОПК-1. Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.</p> <p>ОПК-3. Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты).</p> <p>ОПК-4. Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач.</p>
02.03.02 Фундаментальная информатика и информационные технологии ОПК-2, ОПК-3	ОПК-2 ОПК-3	<p>ОПК-2. Способен применять компьютерные/суперкомпьютерные методы, современное программное обеспечение, в том числе отечественного происхождения.</p> <p>ОПК-3. Способен к разработке алгоритмических и программных решений в области системного и</p>

		прикладного программирования, математических, информационных и имитационных моделей, созданию информационных ресурсов глобальных сетей, образовательного контента, прикладных баз данных, тестов и средств тестирования систем и средств на соответствие стандартам и исходным требованиям.
<p>03.03.02 Физика ОПК-1, ОПК-2</p>	ОПК-1 ОПК-2	<p>ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности.</p> <p>ОПК-2. Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.</p>
<p>03.03.03 Радиофизика ОПК-2</p>	ОПК-2	<p>ОПК-2. Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.</p>
<p>08.03.01 Строительство ОПК-1</p>	ОПК-1	<p>ОПК-1. Способен решать задачи профессиональной деятельности на основе использования теоретических и практических основ естественных и технических наук, а также математического аппарата.</p>
<p>09.03.01 Информатика и вычислительная техника ОПК-1, ОПК-2, ОПК-9</p> <p>09.03.02 Информационные системы и технологии ОПК-1, ОПК-2</p> <p>09.03.03 Прикладная информатика ОПК-1, ОПК-2</p> <p>09.03.04 Программная инженерия ОПК-1, ОПК-2</p> <p>24.03.01 Ракетные комплексы и</p>	ОПК-1 ОПК-2 ОПК-9	<p>ОПК-1. Способен применять естественнонаучные и общетеоретические знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности.</p> <p>ОПК-2. Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и программных средств, в том числе отечественного производства, и использовать их при решении задач профессиональной деятельности.</p> <p>ОПК-9. Способен осваивать методики использования программных средств для решения практических задач.</p>

<p>космонавтика ОПК-1</p> <p>24.03.03 Баллистика и гидроаэродинамика ОПК-1</p> <p>24.03.04 Авиастроение ОПК-1</p> <p>24.03.05 Двигатели летательных аппаратов ОПК-1</p>		
<p>12.03.01 Приборостроение ОПК-1</p>	ОПК-1	<p>ОПК-1. Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с проектированием и конструированием, технологиями производства приборов и комплексов широкого назначения.</p>
<p>12.03.04 Биотехнические системы и технологии ОПК-1</p>	ОПК-1	<p>ОПК-1. Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с разработкой, проектированием, конструированием, технологиями производства и эксплуатации биотехнических систем.</p>
<p>13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника ОПК-3, ОПК-5</p> <p>13.03.02 Электроэнергетика и электротехника ОПК-3</p> <p>13.03.03 Энергетическое машиностроение ОПК-3</p>	ОПК-3 ОПК-5	<p>ОПК-3. Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач.</p> <p>ОПК-5. Способен учитывать свойства конструкционных материалов в теплотехнических расчетах с учетом динамических и тепловых нагрузок.</p>
<p>14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика ОПК-1</p>	ОПК-1	<p>ОПК-1. Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы</p>

<p align="center">14.03.02 Ядерная физика и технологии ОПК-1</p>		<p>математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.</p>
<p align="center">15.03.01 Машиностроение ОПК-1</p> <p align="center">15.03.02 Технологические машины и оборудования ОПК-1</p> <p align="center">15.03.03 Прикладная механика ОПК-1</p> <p align="center">15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств ОПК-1</p> <p align="center">15.03.06 Мехатроника и робототехника ОПК-1</p> <p align="center">23.03.01 Технология транспортных процессов ОПК-1</p> <p align="center">23.03.02 Наземные транспортно-технологические комплексы ОПК-1</p> <p align="center">23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов ОПК-1</p>	<p align="center">ОПК-1</p>	<p>ОПК-1. Способен применять естественнонаучные и общетеоретические знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности.</p>
<p align="center">15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств ОПК-9</p>	<p align="center">ОПК-9</p>	<p>ОПК-9. Способен участвовать в разработке проектов изделий машиностроения.</p>
<p align="center">16.03.01</p>	<p align="center">ОПК-1</p>	<p>ОПК-1. Способен использовать</p>

<p>Техническая физика ОПК-1, ОПК-2, ОПК-6</p> <p>16.03.02 Высокотехнологические плазменные и энергетические установки ОПК-1, ОПК-6</p> <p>16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения ОПК-1, ОПК-6</p>	<p>ОПК-2 ОПК-6</p>	<p>фундаментальные законы природы и основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности.</p> <p>ОПК-2. Способен применять методы математического анализа, моделирования, оптимизации и статистики для решения задач, возникающих в ходе профессиональной деятельности.</p> <p>ОПК-6. Способен самостоятельно работать в средах современных операционных систем, наиболее распространенных прикладных программ и программ компьютерной графики.</p>
<p>16.03.02 Высокотехнологические плазменные и энергетические установки ОПК-2</p> <p>16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения ОПК-2</p>	<p>ОПК-2</p>	<p>ОПК-2. Способен применять методы математического анализа, моделирования, оптимизации и статистики для решения задач, возникающих в ходе профессиональной деятельности.</p>
<p>17.03.01 Корабельное вооружение ОПК-1</p>	<p>ОПК-1</p>	<p>ОПК-1. Способен применять знания естественных и точных наук, методы математического анализа и моделирования для решения профессиональных задач, проводить теоретические и экспериментальные исследования.</p>
<p>21.03.01 Нефтегазовое дело ОПК-1</p>	<p>ОПК-1</p>	<p>ОПК-1. Способен решать задачи, относящиеся к профессиональной деятельности, применяя методы моделирования, математического анализа, естественнонаучные и общеинженерные знания.</p>
<p>22.03.01 Материаловедение и технологии материалов ОПК-1</p> <p>22.03.02 Металлургия ОПК-1</p>	<p>ОПК-1</p>	<p>ОПК-1. Способен решать задачи профессиональной деятельности, применяя методы моделирования, математического анализа, естественнонаучные и общеинженерные знания.</p>
<p>24.03.01</p>	<p>ОПК-5</p>	<p>ОПК-5. Способен использовать</p>

<p>Ракетные комплексы и космонавтика ОПК-5</p> <p>24.03.03 Баллистика и гидроаэродинамика ОПК-5</p> <p>24.03.04 Авиастроение ОПК-5</p> <p>24.03.05 Двигатели летательных аппаратов ОПК-5</p>		<p>современные подходы и методы решения профессиональных задач в области авиационной и ракетно-космической техники, включая управление проектами создания новых образцов техники и утилизации устаревших.</p>
<p>24.03.02 Системы управления движением и навигация ОПК-5</p> <p>24.03.03 Баллистика и гидроаэродинамика ОПК-5</p> <p>24.03.04 Авиастроение ОПК-5</p> <p>24.03.05 Двигатели летательных аппаратов ОПК-5</p>	ОПК-5	<p>ОПК-5. Способен использовать современные подходы и методы решения профессиональных задач в области авиационной и ракетно-космической техники.</p>
<p>26.03.02 Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры ОПК-1</p>	ОПК-1	<p>ОПК-1. Способен использовать основные законы естественно-научных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования.</p>

2. Задачи освоения дисциплины

– освоить основные этапы численного решения задач механики жидкости и газа с использованием современных пакетов вычислительной гидромеханики, а также основные математические модели несжимаемых и сжимаемых сред, используемые в пакете ANSYS FLUENT;

– научиться строить геометрию произвольной расчетной области, генерировать сетки в этих областях и оценивать их качество, выбирать математическую модель для

решения задачи о течении жидкости или газа и задавать её параметры в пакете ANSYS FLUENT, выбирать численный метод решения задачи, управлять процессом расчета в пакете FLUENT, анализировать и представлять результаты расчетов в пакете FLUENT, а также экспортировать результаты в другие программы обработки, использовать полученные знания в своей профессиональной деятельности;

– овладеть навыками чтения конструкторской документации и навыками построения двумерных и трёхмерных моделей в пакете GAMBIT, способами построения сеток и оценкой их качества в пакете GAMBIT, навыками решения наиболее распространённых типов задач механики жидкости и газа в пакете FLUENT, способами представления результатов расчёта.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку ФТД. Факультативные дисциплины.

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Первый семестр и/или второй семестр, зачет.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Пререквизиты – численные методы, гидродинамика.

Параллельно осваиваемые дисциплины – программирование, компьютерные науки, механика-сплошной среды, математическое моделирование.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часа, из которых 76,25 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем:

- лекции: 8 ч.;
- занятия практические – 64,4 ч.;
- групповые консультации – 3,85 ч.;

Объем самостоятельной работы студента составляет 67,75 часа.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Тема 1. Этапы решения задач вычислительной гидродинамики. Основные характеристики течений жидкости и газа.

Краткое содержание темы:

Рассматриваются основные математические понятия, используемые при моделировании течений жидкости. Вводятся основные понятия сплошной среды (элементарный объем, массовые силы, поверхностные силы). Рассматриваются этапы решения задач вычислительной гидродинамики (физическая модель, математическая модель, задание геометрии расчетной области, построение сетки, дискретизация дифференциальных уравнений, выбор метода решения конечно-разностных уравнений, получение численного решения, анализ и визуализация результатов расчета).

Тема 2. Основные уравнения гидромеханики.

Краткое содержание темы:

В данной теме рассматриваются 5 уравнений, выражающих основные законы физики – законы сохранения массы, импульса и энергии. Рассматриваются уравнения неразрывности, векторное уравнение движения (3 скалярных уравнения), уравнение энергии. Рассматриваются математические модели жидкости, используемые при решении

задач гидродинамики (incompressible fluid, incompressible ideal gas, ideal gas, ideal gas with constant heat capacities). Также рассматривается постановка задач гидродинамики: классы задач (нестационарные, стационарные и квазистационарные задачи) и типы граничных условий. Динамические условия (для скорости) - неподвижная стенка, движущаяся твердая стенка, условия на плоскости симметрии течения, условия на оси симметрии, условия на входе в расчетную область, условия на выходе из расчетной области. Тепловые условия на твердой стенке – ГУ I рода (задается значение температуры), ГУ II рода (задается тепловой поток), ГУ III рода (задается теплообмен с внешней средой). Рассматриваются типы граничных условий в пакете FLUENT (WALL, SYMMETRY, PERIODIC, PRESSURE_INLET, VELOCITY_INLET, MASS_FLOW_INLET, PRESSURE_OUTLET, OUTFLOW, PRESSURE_FAR_FIELD, INLET_VENT, OUTLET_VENT, INTAKE_FAN, EXHAUST_FAN).

Тема 3. Модели турбулентности, используемые в пакете FLUENT.

Краткое содержание темы:

В данной теме рассматриваются понятие турбулентного течения, проблема осреднения. Решение проблемы замыкания, уравнения Рейнольдса. Рассматриваются приближение Буссинеска и математические модели турбулентных течений жидкости на ее основе: модель Спаларта-Аллмареса, обзор семейства «k-ε» - моделей турбулентности, «k-ω» - модель турбулентности (различные варианты). Также рассматривается постановка граничных условий для используемых моделей.

Тема 4. Знакомство с препроцессором GAMBIT.

Краткое содержание темы:

В данной теме подробно рассматриваются основные этапы построения расчетных моделей в препроцессоре GAMBIT универсального программного комплекса FLUENT. Рассматриваются интерфейс GAMBIT и файлы, создаваемые при его работе. Рассматриваются основные объекты, используемые при геометрическом моделировании в пакете: точки, отрезки линий, двумерные и трехмерные области, сетки, зоны. Выполняются упражнения по построению геометрических объектов и анализу двумерных и трехмерных сеток в препроцессоре.

Тема 5. Знакомство с универсальным программным комплексом FLUENT.

Краткое содержание темы:

В данном разделе происходит знакомство обучающихся с пользовательским интерфейсом FLUENT. Рассматриваются основные этапы решения задач вычислительной гидродинамики в пакете. Рассматриваются необходимые для решения задачи процессы: импорта созданной в GAMBIT геометрии совместно с построенной сеткой; выбора модели течения; задания параметров веществ, учитываемых в расчете; определения граничных условий; выбора метода численного решения; проведения расчетов; визуализация и анализа результатов.

Тема 6. Решение нестационарной задачи о распространении тепла в твёрдом теле (2D расчет).

Краткое содержание темы:

Рассматривается численное моделирование распространения тепла в покоящейся среде. Решается задача о прогреве грунта с помощью горячего рельса. Строится геометрия двумерного объекта с дальнейшим построением сетки сразу на всех поддоменах расчетной области. Подбирается математическая модель, качественно описывающая протекающий физический процесс прогрева грунта, задаются начальные и граничные условия, параметры сходимости численного метода. Для качественной оценки

имитационного моделирования проводится контроль значений основных характеристик процесса, визуализация распределения температуры в расчетной области с течением времени.

Тема 7. Задача о ламинарном течении воздуха в цилиндрическом канале, имеющем сужение (2D расчет).

Краткое содержание темы:

Рассматривается задача о стационарном изотермическом течении воздуха со скоростью 0.1 м/с в круглой трубе, имеющей сужение. Задача имеет осевую симметрию. В качестве математической модели, описывающей протекающий физический процесс в трубе, выбрана модель вязкой несжимаемой жидкости. Рассматриваются основные этапы работы, как в геометрическом препроцессоре Gambit, так и в пакете Fluent. Производится контроль интегральных величин с дальнейшим анализом полученных результатов расчета.

Тема 8. Задача естественной конвекции. Ламинарный режим (2D расчет).

Краткое содержание темы:

В данной теме рассматриваются математические модели естественной конвекции, используемые в пакете Fluent. В двумерной постановке рассматривается течение в области от нагретой проволоки в стационарной постановке. Производится построение геометрии расчетной области, конечно-объемной сетки. Задаются соответствующие протекающему физическому процессу граничные условия.

Тема 9. Задача естественной конвекции. Турбулентный режим (2D расчет).

Краткое содержание темы:

В данной теме рассматривается конвективное течение в круглой печи с поддувом. Производится построение геометрии расчетной области, конечно-объемной сетки. Задаются соответствующие протекающему физическому процессу начальные и граничные условия. Рассматривается турбулентный режим течения.

Тема 10. Турбулентное течение в смесителе холодной и горячей воды (3D расчет).

Краткое содержание темы:

В данной теме рассматриваются турбулентное течение в смесителе холодной и горячей воды. Производится построение трехмерной геометрии расчетной области, конечно-объемной сетки. Задаются соответствующие протекающему физическому процессу начальные и граничные условия. Рассматривается турбулентный режим течения.

Практический интенсив – Чтение КД и построение 3D моделей в САПР.

Краткое содержание интенсива:

В данном разделе слушателями будут набираться навыки чтения конструкторской документации и построения твердотельных деталей и небольших узловых сборок в САПР. Для трехмерного проектирования изделий и узлов слушателям будут предложены чертежи с заданными размерами, допусками, схемами сборки.

Кейс работодателя 1 - Цифровой двойник шахтного осевого вентилятора (3D расчет).

Краткое содержание практики:

Шахтный осевой вентилятор используется для проветривания тупиковых выработок, а также шахтных стволов и околоствольных выработок. Рассматривается турбулентное течение вязкого несжимаемого изотермического газа в межлопаточном канале осевого вентилятора и всей проточной части лопастной машины. Рассматривается

методика моделирования турбулентных течений в проточной части осевого вентилятора для быстрой оценки аэродинамических характеристик.

Кейс работодателя 2 - Цифровой двойник регулирующего клапана (3D расчет).

Краткое содержание практики:

В данном разделе производится расчет условной пропускной способности регулирующего клапана (3D расчет). При проектировании системы нефте- и газопроводов возникает необходимость установки ряда регулирующих клапанов для реализации тех или иных задач стоящих перед данным участком трубопровода. В данной теме рассматривается математическое моделирование турбулентного течения в регулирующем клапане, и условная пропускная способность клапана на основе рассчитанных в Ansys Fluent интегральных характеристик течения.

Итоговый проект

В заключении курса отводятся часы для самостоятельной работы слушателей курса над итоговым проектом и подготовкой отчета по расчету конкретного течения. Физическая постановка задачи может быть выбрана по желанию студента или дана преподавателем

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения тестов по лекционному материалу, и оценке выполнения итогового проекта, имеющего прикладной или исследовательской характер по расчету конкретного течения.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Итоговая аттестация студентов по кампусному курсу «Цифровые двойники в инженерных задачах» состоит из двух частей. Программа курса считается освоенной при успешном прохождении обоих этапов аттестации:

1. Выполнение индивидуального задания по расчету конкретного течения. Физическая постановка задачи может быть выбрана по желанию обучающегося или дана преподавателем. Задача может иметь прикладной или исследовательский характер.
2. Устный зачет, содержащий один теоретический вопрос из лекционного материала.

Итоговый отчет должен включать следующие разделы:

- введение;
- физическая постановка задачи;
- математическая постановка задачи;
- начальные и граничные условия;
- этапы численного решения поставленной задачи в пакете FLUENT;
- визуализация протекающего физического процесса (распределение модуля скорости/давления/температуры на цилиндрических поверхностях, на плоскостях симметрии, в интересующих сечениях модели);
- анализ полученных результатов расчета, верификация;
- заключение.

Типовые вопросы для проведения промежуточной аттестации в форме зачета:

1. Какой метод дискретизации наиболее удобен для решения задач тепломассопереноса на структурированных сетках?
2. Как вы понимаете термин дискретный?
3. Какой метод дискретизации наиболее эффективен при решении задач динамики жидкостей и газов на неструктурированных сетках?
4. Чем отличаются явная и полностью неявная схемы дискретизации по времени?
5. В чём заключается основная идея метода конечных объёмов?
6. Перечислите основные этапы разработки компьютерной программы для численного моделирования течения жидкости или газа.
7. Как можно убедиться в достоверности результатов, полученных при численных расчётах?
8. Понятия расхода жидкости, потока импульса и теплового потока.
9. Описание течения жидкости с точки зрения Лагранжа и Эйлера.
10. Закон сохранения массы – уравнение неразрывности; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
11. Закон сохранения импульса – уравнение движения; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
12. Уравнение энергии; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
13. Что такое реологические законы и уравнения состояния?
14. Модель идеальной несжимаемой жидкости.
15. Закон Навье-Стокса. Тензор скоростей деформаций.
16. Уравнение движения вязкой жидкости; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
17. Закон Фурье для теплового потока. Уравнение энергии для вязкой жидкости; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
18. Уравнение состояния сжимаемого газа. Уравнение движения для идеального сжимаемого газа; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
19. Упрощенные модели сжимаемого газа: приближение Буссинеска, приближение для течений с существенно дозвуковыми скоростями.
20. Типы граничных условий для течений жидкости и газа.
21. Понятие турбулентного течения. Уравнения Рейнольдса. Понятие турбулентных напряжений.
22. Гипотеза Буссинеска для турбулентных течений. Понятие турбулентной вязкости.
23. Уравнения движения для турбулентного течения с использованием гипотезы Буссинеска.
24. Уравнения энергии для турбулентного течения с использованием гипотезы Буссинеска.
25. Модель Спалларта-Алмареса для турбулентных течений.
26. «k-ε» модель турбулентности.
27. «k-ω» модель турбулентности.
28. Граничные условия на твердой стенке для турбулентных течений. Пристенные функции.
29. Задание граничных условий для турбулентных течений на внешних границах.
30. Метод конечного объема для построения конечно-разностных схем.
31. Понятия аппроксимации, сходимости и устойчивости разностных схем. Теорема Лакса.

Примеры физических постановок задач, для выполнения итогового проекта:

1. Создание расчётной геометрии и разностной сетки изогнутого канала для смешивания жидкостей с различной температурой (турбулентное течение, 2D расчет).
2. Решение задачи о турбулентном течении несжимаемой жидкости в круглой трубе.
3. Решение задачи о ламинарном течении несжимаемой жидкости в круглой трубе.
4. Решение задачи о неизоэтермическом турбулентном течении в канале квадратного сечения.
5. Задача о закрученном течении в трубе.
6. Задача о трансзвуковом течении в сопле Лавалья.
7. Задача о нестационарном течении в разветвляющемся канале.
8. Расчет стационарного осесимметричного турбулентного неизоэтермического течения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрическом канале с внезапным расширением.
9. Расчет неизоэтермического рециркуляционного турбулентного течения в канале.
10. Расчет стационарного трехмерного турбулентного изоэтермического течения вязкой несжимаемой жидкости над пластиной.
11. Расчет стационарного, несжимаемого турбулентного течения за обращённым назад уступом.
12. Расчет стационарного осесимметричного турбулентного неизоэтермического течения реагирующих газов в цилиндрическом канале.
13. Расчет осесимметричного течения около сферы радиуса R , обтекаемой равномерным потоком воздуха.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=35489>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

в) Для успешного освоения материала студентам необходимо посещать занятия. Во время самостоятельной работы пользоваться основной и дополнительной литературой, базами данных и информационно-справочными системами, которые представлены в списке литературы, а также методическими материалами по данному курсу.

Самостоятельная работа включает в себя: теоретическое освоение вопросов математического моделирования течений жидкости и газа, постановок рассматриваемых задач по расчету конкретного течения, оформления отчета по итоговому индивидуальному проекту.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) **основная литература:**

- ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». – Режим доступа: <http://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=241313>
- ГОСТ Р 57188–2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. – Режим доступа: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=205363>
- ГОСТ Р 57700.22–2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация

- Режим доступа: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=239182>
- Арсеньев А.А., Самарский А.А. Что такое математическая физика. – М.: Знание, 1983. – 64 с.
 - Самарский А.А. Современная прикладная математика и вычислительный эксперимент / Коммунист. – 1983. – № 18. – С. 31-42.
 - Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
 - Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов. – Киев: Наукова думка, 1976. – 271 с.
 - Эглит М.Э. Лекции по основам механики сплошных сред. М.:Ленанд, 2014. 206 с.
 - Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. газа: Учеб. для вузов. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.
 - Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие / А.И. Боровков, С.Ф. Бурдаков, О.И. Клявин, М.П. Мельникова, А.А. Михайлов, А.С. Немов, В.А. Пальмов, Е.Н. Силина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с. – URL: https://fea.ru/spaw2/uploads/files/2012_Книги_СНО_и_КИ/2013_0101_НИУ_СПбГПУ_Боровков_А_И_и_др_Компьютерный_инжиниринг-2012.pdf
 - Гриднева В.А. Лекции по механике сплошной среды. Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет. Томск, 2004. - 428 с
 - А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. Учеб. пособие. - СПб: Изд-во Политехн. ун- та, 2012. – 88 с.
 - Румянцев А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности. Калининград: Балт. фед. унив. 2011. 113с.
 - Моделирование технологических процессов: конспект лекций / В.А. Штерензон. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. – 66 с.
 - Процесс системной инженерии. – URL: http://sewiki.ru/Процесс_системной_инженерии

б) дополнительная литература:

- Самарский А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент / Вестник АН СССР. – 1979. – № 5. – С. 38-49.
- Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Механика и прикладная математика. Логика и особенности приложений математики. – М.: Наука, 1990. – 356 с.
- Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х томах. – М.: Мир, 1990.
- International Council on Systems Engineering. URL: https://www.incose.org/aboutsystems-engineering/system-and-se-definition/systems-engineeringdefinition#ENGINEERED_SYSTEM
- Фирсов Д.К. Метод контрольного объёма на неструктурированной сетке в вычислительной механике (электронное учебное пособие). Томск. 2007. 72с.
- Патанкар С., Сполдинг Д. Тепло и массообмен в пограничных слоях. – М.: Энергия, 1971.
- Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Численные методы газовой динамики. – М.: Высш. шк., 1987 – 232 с.
- Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 143 с.

- Батури́н О.В., Батури́н Н.В., Матвеев В.Н. Построение расчетных моделей в препроцессоре Gambit универсального программного комплекса Fluent: учеб. пособие – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 172 с.:ил.
- Батури́н О.В., Батури́н Н.В., Матвеев В.Н. Расчет течений жидкости и газа с помощью универсального программного комплекса FLUENT. Учеб. пособие – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. - 151с.: ил.

в) ресурсы сети Интернет:

- Система помощи в пакете ANSYS FLUENT;
- Старченко А.В., Беликов Д.А., Гольдин В.Д., Нутерман Р.Б. Пакет прикладных программ FLUENT для решения задач механики жидкости и газа, тепло- и массопереноса. Учебно-методический комплекс. Томск, 2007. <https://old.math.tsu.ru/EEResources/fluent/index.html>; http://ido.tsu.ru/iop_res2/fluent/.

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Операционная система Windows 7 или Windows 10 <https://www.microsoft.com/ru-ru/software-download/windows10>;
- Геометрический препроцессор GAMBIT 2.4.6;
- Пакет ANSYS FLUENT 17.2.

б) информационные справочные системы:

- – Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- – Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- – ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
-

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам, а также с доступом к лицензионному программному обеспечению.

15. Информация о разработчиках

Гольдин Виктор Данилович, кандидат физико-математических наук, доцент;

Гурина Елена Ивановна, кандидат физико-математических наук, доцент;

Данилкин Евгений Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Курс «Цифровые двойники в инженерных задачах» разработан при поддержке Регионального научно-образовательного математического центра Томского государственного университета (НОМЦ ТГУ).