

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

Механико-математический факультет

УТВЕРЖДЕНО:

Декан

Л. В. Гензе

Рабочая программа дисциплины

Математические модели турбулентности

по направлению подготовки / специальности

01.03.03 Механика и математическое моделирование

Направленность (профиль) подготовки/ специализация:
Теоретическая, вычислительная и экспериментальная механика

Форма обучения

Очная

Квалификация

Механик. Преподаватель физико-математических дисциплин

Год приема

2024, 2025

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

Л.В. Гензе

Председатель УМК

Е.А. Тарасов

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области математических наук и механики в профессиональной деятельности.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ООПК-1.1 Знает типовые постановки задач математики и механики, классические методы решения, теоретические основы методов и границы их применимости

ООПК-1.2 Способен адаптировать известные математические методы для решения поставленной задачи в области математики и механики

ООПК-1.3 Способен провести решение поставленной задачи в области математики и механики с использованием полученных фундаментальных знаний и получить результат

ООПК-2.1 Знает методику выявления естественнонаучной сущности проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, и методику привлечения физико-математического аппарата и современные компьютерных технологий для их решения

ООПК-2.2 Умеет выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности и привлекать для их решения физико-математический аппарат и современные компьютерные технологии

2. Задачи освоения дисциплины

1. Изучить основные понятия турбулентности: природу турбулентных течений, статистические методы описания, уравнения Рейнольдса.
2. Рассмотреть классические модели турбулентности. Анализировать достоинства и недостатки различных моделей в зависимости от типа течения.
3. Освоить базовые возможности OpenFOAM для моделирования турбулентных течений.
4. Провести расчёты для различных течений (канал, след за телом) с использованием разных моделей турбулентности.
5. Сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными или эталонными решениями (например, профили скорости, коэффициенты сопротивления).

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку 3 «Блок направления и специализации».

Дисциплина относится к обязательной части образовательной программы.

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

Десятый семестр, зачет

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Математический анализ и механика сплошных сред.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

– лекции: 24 ч.

– практические занятия: 24 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Раздел 1: Введение в турбулентность и основы осреднения

Тема 1: Природа турбулентности. Основные понятия.

Краткое содержание темы. Определение турбулентности, ключевые характеристики (нерегулярность, диффузивность, диссипативность, трехмерность вихрей, непрерывный спектр масштабов). Примеры турбулентных течений. Число Рейнольдса и переход к турбулентности.

Тема 2: Статистическое описание турбулентности.

Краткое содержание темы. Осреднение по времени и ансамблю. Флуктуации скорости и давления. Уравнения для осредненных величин и моментов.

Тема 3: Уравнения Рейнольдса. Проблема замыкания.

Краткое содержание темы. Вывод уравнений Рейнольдса из уравнений Навье-Стокса. Рейнольдсовы напряжения (тензор напряжений). Сущность проблемы замыкания. Иерархия моделей. Введение в гипотезу Буссинеска.

Раздел 2: Классические модели RANS и их реализация в OpenFOAM

Тема 1: Алгебраические модели и модели с одним уравнением переноса.

Краткое содержание темы. Модель длины пути смешения Прандтля. Модель Спаларта-Аллармаса: физические предпосылки, область применения (в основном внешняя аэродинамика), граничные условия. Реализация SA в OpenFOAM.

Тема 2: Двухпараметрические модели: k-эпсилон (k-ε).

Краткое содержание темы. Физический смысл кинетической энергии турбулентности (k) и скорости ее диссипации (ε). Стандартная k-ε модель, ее допущения, достоинства и недостатки. Популярные модификации (RNG k-ε, Realizable k-ε). Граничные условия для k и ε. Реализация в OpenFOAM.

Тема 3: Двухпараметрические модели: k-омега (k-ω) и SST.

Краткое содержание темы. Физический смысл удельной скорости диссипации (ω). Стандартная k-ω модель Вилкокса. Достоинства (работа в вязком подслое) и недостатки (чувствительность к условиям на входе). Модель Menter SST (k-ω/k-ε гибрид): объединение преимуществ k-ω во внутренних областях и k-ε во внешних. Области применения. Реализация в OpenFOAM.

Тема 4: Сравнение и выбор моделей RANS в OpenFOAM.

Краткое содержание темы. Критерии выбора модели для различных типов течений (отрывные течения, сжимаемые течения, теплообмен). Практические рекомендации. Настройка параметров моделей. Анализ чувствительности результатов к выбору модели.

Раздел 3: Продвинутые подходы: LES, DES и основы DNS

Тема 1: Прямое численное моделирование (DNS).

Краткое содержание темы. Принципы DNS: разрешение всех масштабов турбулентности. Требования к вычислительным ресурсам. Область применимости (низкие Re, фундаментальные исследования).

Тема 2: Моделирование крупных вихрей (LES).

Краткое содержание темы. Фильтрация уравнений Навье-Стокса. Субсеточные масштабы и необходимость субсеточных моделей (SGS). Классические SGS модели (Smagorinsky, Dynamic Smagorinsky, Scale-Adaptive Simulation - SAS). Реализации в OpenFOAM.

Тема 3: Гибридные RANS-LES подходы (DES и производные).

Краткое содержание темы. Сочетание эффективности RANS вблизи стенок и точности LES в отрывных зонах. Основной принцип DES (Detached Eddy Simulation): переключение между RANS и LES на основе размера ячейки сетки. Области применения. Реализации в OpenFOAM.

Раздел 4: Практические аспекты моделирования в OpenFOAM

Тема 1: Подготовка расчетов: сетка и граничные условия для турбулентности.

Краткое содержание темы. Требования к сетке для RANS (y^+), LES/DES. Генерация сетки (blockMesh, snappyHexMesh, cfMesh). Специфика задания граничных условий для турбулентных параметров (k , ϵ , ω , ν_t) на различных типах границ (вход, выход, стенка, симметрия).

Тема 2: Настройка решателя и численных схем.

Краткое содержание темы. Файлы настройки OpenFOAM: fvSchemes (выбор дискретных схем для производных), fvSolution (настройки решателей для уравнений давления/скорости и турбулентных величин, параметры сходимости).

Тема 3: Обработка, визуализация и анализ результатов.

Краткое содержание темы. Использование постпроцессора для вычисления полей (напряжения на стенке, коэффициенты, интегральные величины). Визуализация в ParaView: построение графиков профилей скорости, турбулентных характеристик, анализ полей.

Тема 4: Валидация и верификация. Введение в современные методы.

Краткое содержание темы. Понятия валидации и верификации. Процедуры тестирования моделей (течение в канале, на плоской пластине, вокруг цилиндра).

Раздел 5: Решение задач гидродинамики в пакете OpenFOAM

Тема 1: Моделирование турбулентного течения в канале.

Краткое содержание темы. Постановка задачи. Расчет профилей скорости, турбулентной кинетической энергии, диссипации. Сравнение результатов различных моделей RANS (k - ϵ , k - ω , SST) и LES с теорией/Данными DNS. Анализ влияния сетки.

Тема 2: Обтекание простых тел.

Краткое содержание темы. Расчет сил сопротивления и подъемной силы. Анализ отрывных зон. Сравнение RANS (SA, SST) и DES подходов. Визуализация следа.

Тема 3: Решение выбранной инженерной задачи (на усмотрение преподавателя).

Краткое содержание темы. Примеры: теплообмен в турбулентном потоке, течение в сложном трубопроводе. Интеграция моделей турбулентности с другими физическими моделями (теплопередача, горение, многофазность) в OpenFOAM.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, выполнения индивидуальных работ, проведения контрольной работы и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» - <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в десятом семестре проводится в письменной форме. Продолжительность зачета с оценкой 2 часа.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» - <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

11. Учебно-методическое обеспечение

- а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «IDo» - <https://lms.tsu.ru/course/view.php?id=37885>
- б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие, Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2001. 108 с.
2. Курбацкий А.Ф. Лекции по турбулентности: учебное пособие, редакционно-издательский центр НГУ, 2021. 118 с.
3. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие, СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2001. – 564 с.

б) дополнительная литература:

5. Мазо А.Б. Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости. Учебное пособие. Казань: КГУ. 2007. 209 с.
6. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003. 292 с.
7. Старченко А.В., Нутерман Р.Б., Данилкин Е.А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. Томск: Издательство Томского университета, 2015. 252 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: т. IV. Гидродинамика. М.: Наука, 1988, 736 с.

в) ресурсы сети Интернет:

- Общероссийская Сеть КонсультантПлюс Справочная правовая система. <http://www.consultant.ru>
- ScienceDirect [Electronic resource] / Elsevier B.V. – Electronic data. – Amsterdam, Netherlands, 2016. – URL: <http://www.sciencedirect.com/>
- Электронная библиотека ТГУ: <http://www.lib.tsu.ru/ru>

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
- публично доступные облачные технологии (Яндекс диск и т.п.).

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/>
- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

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.

15. Информация о разработчиках

Мирошниченко Игорь Валерьевич, к.ф.-м.н., доцент, кафедра теоретической механики ММФ, доцент

Рабочая программа одобрена на заседании УМК ММФ

Протокол от ____ 202_ № __