

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

Механико-математический факультет

УТВЕРЖДЕНО:

Декан

Л. В. Гензе

Оценочные материалы по дисциплине

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. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

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. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

- контрольная работа (ООПК-1.1, ООПК-1.2, ООПК-1.3, ООПК-2.1, ООПК-2.2).
- индивидуальные задания; (ООПК-1.2, ООПК-1.3, ООПК-2.1, ООПК-2.2);

Контрольная работа состоит из 15 теоретических вопросов.

1. Дайте определение турбулентности. Назовите ключевые характеристики турбулентного течения.
2. Что такое число Рейнольдса (Re)? Как оно связано с переходом от ламинарного течения к турбулентному?
3. В чём суть осреднения по Рейнольдсу? Запишите формулу для осреднённой скорости и флуктуации.
4. Что такое тензор рейнольдсовых напряжений? Почему он возникает в уравнениях Рейнольдса (RANS)?
5. Объясните гипотезу Буссинеска. Какие ограничения она имеет?
6. Перечислите три типа моделей RANS по количеству уравнений переноса. Приведите примеры.
7. В чём недостатки стандартной модели $k-\epsilon$? Для каких течений она неприменима?
8. Почему модель $k-\omega$ SST лучше описывает течения вблизи стенок?
9. Чем DNS (прямое численное моделирование) отличается от RANS? Какие ограничения имеет DNS?
10. Как работает модель LES (крупных вихрей)?
11. Что такое параметр y^+ ? Какие значения y^+ требуются для: Модели $k-\epsilon$? Модели $k-\omega$ SST?
12. Как выбирают граничные условия для турбулентной кинетической энергии на входе в расчетную область?
13. Для чего в турбулентных моделях используют «замыкающие константы» (например, C_μ в $k-\epsilon$)? Как их определяют?
14. Для чего в OpenFOAM используются файлы fvSchemes и fvSolution? Как выбор схемы для конвективных членов влияет на устойчивость расчета?

15. Почему DES называют «гибридным» методом? Как в OpenFOAM реализовано переключение между RANS и LES в зонах течения?

Ниже представлен пример индивидуального задания.

Исследовать обтекание цилиндра диаметром $d=0.1\text{ м}$ при скорости набегающего потока $U_\infty=1\text{ м/с}$. Кинематическая вязкость воздуха $\nu=1.5\times 10^{-5}\text{ м}^2/\text{с}$ (число Рейнольдса $Re\approx 6667$).

Цели:

Сравнить результаты моделирования с использованием RANS ($k-\omega$ SST) и LES (Smagorinsky). Определить коэффициенты аэродинамического сопротивления и частоту срыва вихрей. Визуализировать структуру течения (вихри, зоны отрыва).

Структура отчета по индивидуальному заданию:

1. Введение (физика задачи, цели).
2. Методика:
 - Описание сетки (скриншоты, число ячеек, y^+).
 - Параметры моделей (настройки fvSchemes, fvSolution).
3. Результаты:
 - Таблицы с C_d и St для RANS и LES.
 - Графики:
 - Зависимость C_d от времени.
 - Сравнение профилей скорости за цилиндром с экспериментами.
 - Рисунки:
 - Распределение давления (RANS/LES).
 - Вихревая структура.
4. Выводы:
 - Точность моделей, влияние сетки, вычислительные затраты.

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

Зачет проводится в письменной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса (проверяющих заявленные индикаторы достижения компетенций, указанные в п.1.). Продолжительность зачета 1,5 часа.

Примерный перечень теоретических вопросов:

1. Объясните физический смысл осреднения по Рейнольдсу.
2. Почему в уравнениях Рейнольдса возникает проблема замыкания?
3. В чём суть гипотезы Буссинеска?
4. Назовите ключевые характеристики турбулентного течения.
5. Чем ламинарный пограничный слой отличается от турбулентного?
6. Что описывает тензор рейнольдсовых напряжений?
7. Объясните концепцию энергетического каскада в турбулентности.
8. Зачем вводится понятие "длина пути смешения"?
9. Почему модель $k-\epsilon$ неприменима для течений с сильным отрывом?
10. В чём преимущество модели $k-\omega$ SST перед стандартной $k-\omega$?
11. Чем LES принципиально отличается от RANS?
12. Что такое "субсеточная модель" в LES?
13. Почему DNS редко используется в инженерных расчётах?
14. Как гибридные методы (DES) сочетают RANS и LES?
15. Что характеризует число Струхала?

16. Объясните физический смысл турбулентной вязкости.
17. Почему двухпараметрические модели точнее алгебраических?
18. Какие течения называют "квазистационарными"?
19. Что такое "вязкий подслой" в турбулентном пограничном слое?
20. Как влияет кривизна стенки на точность RANS-моделей?
21. Чем изотропная турбулентность отличается от анизотропной?
22. Почему в LES критично разрешение крупных вихрей?
23. Что такое "спектр турбулентности"?
24. Как определяют границы применимости моделей турбулентности?
25. Объясните термин "турбулентная диффузия".
26. Какие файлы в OpenFOAM отвечают за выбор модели турбулентности?
27. Как задать граничное условие "стенка" для поля скорости?
28. Зачем нужен файл fvSchemes?
29. Как в OpenFOAM реализована модель Smagorinsky для LES?
30. Что контролирует файл fvSolution?
31. Какой решатель использовать для стационарных RANS-расчётов?
32. Объясните назначение утилиты snappyHexMesh.
33. Почему для LES важен выбор схемы для конвективных членов?
34. Где задаются начальные условия для турбулентных величин?
35. Как проверить значение y^+ после генерации сетки?
36. Зачем нужна утилита checkMesh?
37. Почему для $k-\omega$ SST требуется более мелкая сетка у стенки, чем для $k-\epsilon$?
38. Как активировать модель Spalart-Allmaras в OpenFOAM?
39. Чем pimpleFoam отличается от pisoFoam?
40. Объясните назначение папки 0/ в разделе с задачей.

Результаты зачета определяются оценками «зачтено», «не зачтено».

Зачтено	Выставляется студенту, владеющему базовыми знаниями в области изучаемой дисциплины
Не зачтено	Выставляется студенту в случае отсутствия знаний по вопросам билета теоретического зачета.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Тест (РООПК-1.1, РООПК-1.2):

Инструкция: Выберите один правильный ответ для каждого вопроса.

1. Что является основной характеристикой турбулентного течения?

- а) Ламинарность и упорядоченность
- б) Хаотичность и нерегулярность
- в) Постоянство скорости во времени
- г) Отсутствие вихрей

2. Какое из перечисленных уравнений является основой для моделирования турбулентности в RANS-подходе?

- а) Уравнение Лапласа
- б) Уравнение Навье-Стокса

в) Уравнение Бернулли

г) Уравнение Пуассона

3. Для чего в OpenFOAM используется файл turbulenceProperties?

а) Для задания граничных условий

б) Для выбора модели турбулентности

в) Для определения шага по времени

г) Для настройки сетки

4. Какая из моделей турбулентности относится к классу LES (Large Eddy Simulation)?

а) $k-\varepsilon$

б) Spalart-Allmaras

в) Smagorinsky

г) $k-\omega$ SST

5. Что описывает число Рейнольдса в контексте турбулентности?

а) Отношение вязких сил к инерционным

б) Скорость звука в потоке

в) Теплопроводность жидкости

г) Давление в потоке

6. Какой файл в OpenFOAM отвечает за настройку параметров дискретизации при моделировании турбулентности?

а) controlDict

б) fvSchemes

в) fvSolution

г) transportProperties

7. Какой физический процесс моделируется с помощью уравнения переноса кинетической энергии турбулентности (k)?

а) Вязкое трение

б) Генерация и диссипация турбулентности

в) Теплообмен

г) Сжимаемость потока

8. Какой параметр в модели $k-\varepsilon$ определяет скорость диссипации турбулентной энергии?

а) k

б) ε

в) ω

г) ν

9. Какой подход к моделированию турбулентности требует наибольших вычислительных ресурсов?

а) RANS

б) LES

в) DNS

г) DES

10. Какой метод в OpenFOAM используется для учета движения сетки в турбулентных течениях?

а) Dynamic mesh (движущаяся сетка)

б) Immersed boundary method

в) Overset mesh

г) ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian)

11. Что означает осреднение по Рейнольдсу в RANS-подходе?

а) Усреднение уравнений по пространству

б) Усреднение уравнений по времени

- в) Усреднение уравнений по ансамблю
- г) Линеаризацию уравнений

12. Какой член в уравнениях Навье-Стокса после осреднения приводит к появлению рейнольдсовых напряжений?

- а) Конвективный член
- б) Вязкий член
- в) Член, связанный с давлением
- г) Член, связанный с массовыми силами

13. Какая из моделей турбулентности является двухпараметрической?

- а) Spalart-Allmaras
- б) k-ε
- в) Smagorinsky
- г) Baldwin-Lomax

14. В каком файле OpenFOAM задаются физические свойства жидкости (вязкость, плотность)?

- а) transportProperties
- б) thermophysicalProperties
- в) turbulenceProperties
- г) dynamicMeshDict

15. Какой метод в OpenFOAM используется для решения уравнений?

- а) Метод конечных элементов (FEM)
- б) Метод конечных объемов (FVM)
- в) Метод спектральных элементов (SEM)
- г) Метод граничных элементов (BEM)

16. Какое допущение используется в модели турбулентности Spalart-Allmaras?

- а) Изотропность турбулентности
- б) Однородность турбулентности
- в) Только для пристеночных течений
- г) Только для несжимаемых потоков

17. Какой параметр в OpenFOAM определяет точность вычисления градиентов?

- а) nNonOrthogonalCorrectors
- б) tolerance в fvSolution
- в) gradSchemes в fvSchemes
- г) relaxationFactors

18. Какой тип граничного условия обычно используется для скорости на входе в турбулентное моделирование?

- а) fixedValue
- б) zeroGradient
- в) slip
- г) symmetryPlane

19. Какой файл в OpenFOAM определяет схемы дискретизации?

- а) fvSchemes
- б) fvSolution
- в) controlDict
- г) snappyHexMeshDict

20. Какой подход (RANS, LES, DNS) требует наименьшего количества вычислительных ресурсов?

- а) RANS
- б) LES
- в) DNS
- г) DES

21. Какой параметр в OpenFOAM управляет неортогональной коррекцией сетки?

- а) nNonOrthogonalCorrectors
- б) correctors
- в) orthogonalCorrectors
- г) nonOrthogonalTolerance

22. Какое уравнение замыкания используется в стандартной модели k-ε?

- а) Уравнение состояния идеального газа
- б) Уравнение Буссинеска
- в) Уравнение для кинетической энергии турбулентности и её диссипации
- г) Уравнение теплопроводности

23. Какой тип граничного условия обычно используется для давления на выходе?

- а) fixedValue
- б) zeroGradient
- в) inletOutlet
- г) pressureInletOutletVelocity

24. Какой член в уравнении для k (кинетической энергии турбулентности) отвечает за её генерацию?

- а) Производная по времени
- б) Конвективный член
- в) Член, связанный с градиентом скорости
- г) Диссипационный член

25. Какой решатель OpenFOAM используется для несжимаемых турбулентных течений?

- а) icoFoam
- б) pimpleFoam
- в) rhoCentralFoam
- г) sonicFoam

Критерии оценивания: тест считается пройденным, если обучающий ответил правильно более чем на 60% вопросов.

Информация о разработчиках

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