

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

Вычислительная гидроаэродинамика. Часть 1.

по направлению подготовки

01.04.01 Математика

Направленность (профиль) подготовки:
Моделирование и цифровые двойники

Форма обучения
Очная

Квалификация
Магистр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

Е.И. Гурина

Председатель УМК

Е.А. Тарасов

Томск – 2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен формулировать и решать актуальные и значимые проблемы математики.

ОПК-2 Способен строить и анализировать математические модели в современном естествознании, технике, экономике и управлении.

ПК-1 Способен разрабатывать и внедрять цифровые двойники, используя современные технологии, методы и инструменты, с учетом технических требований заказчика и специфики моделируемых объектов и процессов.

ПК-2 Способен проводить тестирование, валидацию и анализ данных цифровых двойников для обеспечения их корректной работы, оптимизации процессов и принятия решений.

ПК-4 Способен документировать процессы разработки и эксплуатации цифровых двойников, работать в команде и взаимодействовать с заказчиками и специалистами для успешной реализации проектов.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 Формулирует поставленную задачу, пользуется языком предметной области, обоснованно выбирает метод решения задачи.

ИОПК 1.2 Анализирует актуальные и значимые проблемы математики и существующие подходы к их решению.

ИОПК 2.1 Анализирует, выбирает и обосновывает математические модели для решения задач в области современного естествознания, техники, экономики и управления.

ИОПК 2.2 Разрабатывает новые и/или адаптирует/совершенствует математические модели для задач современного естествознания, техники, экономики и управления под руководством более квалифицированного работника.

ИПК 1.1 Анализирует и выбирает современные технологии, методы и инструменты для проектирования и разработки цифровых двойников с учетом специфики решаемых задач.

ИПК 1.2 Разрабатывает цифровые двойники на основе технических требований заказчика и особенностей моделируемых объектов и процессов.

ИПК 1.3 Разрабатывает математические модели и алгоритмы для создания математической основы цифровых двойников изделий и технических систем.

ИПК 1.4 Применяет современные программные продукты и среды для моделирования и симуляции цифровых двойников.

ИПК 2.1 Проводит тестирование и отладку цифровых двойников для обеспечения их корректной работы и соответствия заданным параметрам.

ИПК 2.3 Проводит валидацию цифровых двойников для подтверждения их соответствия требованиям заказчика.

ИПК 4.2 Эффективно взаимодействует с инженерами, программистами и заказчиками в рамках командной работы для успешной реализации проектов.

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

- посещение занятий;
- выполнение упражнений по построению геометрических областей и сеток;
- решение различных задач по расчету течений жидкости и газа, а также теплопереноса под руководством преподавателя;
- выполнение упражнений по представлению результатов расчетов под руководством преподавателя;

- для текущего усвоения материала используются вопросы для самоконтроля.

Примеры упражнений по построению геометрических областей и сеток (ИПК 1.4).

1. Создать плоскую прямоугольную область с заданными размерами. Построить сетку на границах области и структурированную сетку внутри неё, содержащую сеточные пограничные слои.
2. Создать треугольную область с вершинами в заданных точках. Построить сетку внутри области.
3. Построить цилиндр с заданными размерами. Построить неструктурированную сетку (типа Pave) с четырехугольными элементами и сеточным пограничным вблизи окружности. Построить сетку внутри цилиндра методом Sweep.
4. В шаре заданного радиуса построить неструктурированную сетку с шестигранными элементами.
5. Построить область, состоящей из соединяющихся труб, для задачи о смесителе горячей и холодной воды. Построить неструктурированную сетку внутри области.

Расчеты течений жидкости и газа, а также теплопереноса под руководством преподавателя (ИОПК 2.1, ИОПК 2.2, ИОПК 1.4). В каждой задаче необходимо построить расчетную область и сетку в ней, используя возможности пакета GAMBIT. В пакете ANSYS FLUENT задать исходные данные и произвести расчет. Примеры задач:

1. Нестационарная задача о распространении тепла в твёрдом теле.
2. Задача о стационарном ламинарном течении глицерина в круглой трубе переменного диаметра.
3. Задача о стационарном ламинарном течении и теплообмене несжимаемой жидкости в круглой трубе, имеющей сужение.
4. Задачи о турбулентном течении в трубе переменного сечения с учетом теплообмена со стенкой, имеющей температуру, отличающую от температуры жидкости.
5. Трансзвуковое течение в сопле Лавала с учетом турбулентного пограничного слоя на его стенках. Определение теплового и силового воздействия течения на стенки сопла.
6. Задача о трехмерном турбулентном течении жидкости в смесителе холодной и горячей воды.
7. Задача сверхзвукового обтекания сферы тела вязким потоком газа при ламинарном режиме течения.

Упражнения по представлению результатов расчетов средствами пакета ANSYS FLUENT (ИПК 1.4). В каждой задаче, рассматриваемой в процессе обучения:

1. Получить визуальное изображение картины течения внутри области и поле основных определяемых величин: модуля скорости, компонент скорости, температуры.
2. Построить графики основных определяемых величин на границах расчетной области, так и на задаваемых линиях внутри нее.
3. Вычислить интегральные характеристики течения.

Перечень вопросов для самоконтроля (ИОПК 2.1, ИОПК 4.3):

1. Понятие сплошной среды. Элементарный жидкий объём и его основные характеристики: плотность, скорость, внутренняя энергия.
2. Массовые и поверхностные силы в сплошной среде. Плотность массовых сил и внутреннее напряжение.
3. Тензор напряжений; давление и тензор вязких напряжений.

4. Понятия расхода жидкости, потока импульса и теплового потока.
5. Характеристики силового и теплового воздействия жидкости на элементы конструкций.
6. Описание течения жидкости с точки зрения Лагранжа и Эйлера.
7. Системы координат, вектора базиса, метрический тензор пространства (коэффициенты Лямэ). Декартова и цилиндрическая система координат.
8. Понятия дивергенции и вихря. Их выражения в декартовой и цилиндрической системах координат.
9. Теоремы Стокса и Гаусса-Остроградского в механике жидкости.
10. Ускорение элементарного жидкого объема, его вычисление в декартовой и цилиндрической системах координат.
11. Производная по времени от интеграла по жидкому объему.
12. Закон сохранения массы – уравнение неразрывности; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
13. Закон сохранения импульса – уравнение движения; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
14. Уравнение энергии; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
15. Что такое реологические законы и уравнения состояния?
16. Модель идеальной несжимаемой жидкости.
17. Закон Навье-Стокса. Тензор скоростей деформаций.
18. Уравнение движения вязкой жидкости; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
19. Закон Фурье для теплового потока. Уравнение энергии для вязкой жидкости; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
20. Уравнение состояния сжимаемого газа. Уравнение движения для идеального сжимаемого газа; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
21. Упрощенные модели сжимаемого газа: приближение Буссинеска, приближение для течений с существенно дозвуковыми скоростями.
22. Интеграл Бернулли для несжимаемой жидкости.
23. Понятие совершенного газа. Интеграл Бернулли для совершенного газа.
24. Инварианты Римана для нестационарных течений совершенного газа.
25. Типы граничных условий для течений жидкости и газа.
26. Понятие турбулентного течения. Уравнения Рейнольдса. Понятие турбулентных напряжений.
27. Гипотеза Буссинеска для турбулентных течений. Понятие турбулентной вязкости.
28. Уравнения движения для турбулентного течения с использованием гипотезы Буссинеска.
29. Уравнение энергии для турбулентного течения с использованием гипотезы Буссинеска.
30. Модель Спалларта-Алмареса для турбулентных течений.
31. «k-ε» модель турбулентности.
32. «k-ω» модель турбулентности.
33. Граничные условия на твердой стенке для турбулентных течений. Пристенные функции.
34. Задание граничных условий для турбулентных течений на внешних границах.
35. Метод конечного объема для построения конечно-разностных схем.
36. Понятия аппроксимации, сходимости и устойчивости разностных схем. Теорема Лакса.

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

Промежуточная аттестация состоит из двух частей:

1. Выполнение индивидуального задания по расчету конкретного течения. Задача может быть выбрана по желанию студента или дана преподавателем. Она может иметь прикладной или исследовательский характер. По результатам выполнения задания оформляется письменный отчет.

2. Зачет с оценкой, содержащий один вопрос по теоретическому материалу, используемому в курсе.

Примеры формулировок задач для индивидуальных заданий:

1. Построить конечно-разностную сетку и провести расчет на основе пакета FLUENT ламинарного неизотермического течения воздуха в круглой трубе при $Re = 10$ и $Pr = 5$. Построить графики изменения осевой скорости, коэффициента трения и безразмерного коэффициента теплообмена. Оценить длину начального гидродинамического и термического участков.

2. Прямоугольная пластина имеет длину в направлении потока 120 см и ширину 200 см. Температура пластины поддерживается равной 353 К при обтекании ее азотом, имеющим скорость 2,5 м/с и температуру 273 К. Определить локальный и средний коэффициент трения, локальный и средний коэффициент конвективной теплоотдачи, общий тепловой поток от пластины.

3. Построить конечно-разностную сетку и провести расчет ламинарного обтекания сферы радиуса 0.007 м при параметрах набегающего потока: скорость - 660 м/с, плотность - 10^{-3} кг/м³, температура 273 К ($M_\infty = 2$, $Re \approx 270$). Температура поверхности тела - 300 К.

4. Рассчитать течение метана в разветвляющейся трубе. Температура на входе в основную трубу 293 К, температура стенок 250 К.

5. Рассчитать турбулентное течение несжимаемой жидкости в круглой трубе с локальным препятствием.

6. Рассчитать турбулентное течение в сопле Лаваля с центральным телом в трансзвуковой части.

7. Рассчитать течение в круглой трубе с поддувом более горячего газа.

Вопросы к зачету с оценкой:

1. Основные понятия гидромеханики: плотность, скорость, внутренняя и полная энергия, массовые и поверхностные силы, тензор напряжений, давление, тензор вязких напряжений.

2. Основные уравнения гидромеханики, выражающие физические законы сохранения.

3. Проблема замыкания уравнений гидродинамики. Реологические законы и уравнения состояния. Закон Навье-Стокса.

4. Модель идеального газа. Уравнения и граничные условия.

5. Модель вязкой несжимаемой жидкости. Уравнения и граничные условия.

6. Модель течений газа при малых дозвуковых скоростях («incompressible ideal gas»). Уравнения и граничные условия.

7. Понятие турбулентного течения. Уравнения Рейнольдса. Турбулентные напряжения. Гипотеза Буссинеска для турбулентных течений. Турбулентная вязкость.

8. Гипотеза Буссинеска для турбулентных течений. Уравнения движения и энергии для турбулентных течений с использованием этой гипотезы.

9. Обзор методов моделирования турбулентных течений, основанных на гипотезе Буссинеска.

10. Граничные условия на твердой стенке для турбулентных течений. Пристенные функции.

11. Основные понятия теории разностных схем: аппроксимация, сходимость, устойчивость. Теорема Лакса. Метод конечного объема для построения конечно-разностных схем.

Критерии оценивания:

Результаты зачета определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» ставится при успешной защите индивидуального задания, оформлении отчета по заданию и правильном развернутом ответе на зачете.

Оценка «хорошо» выставляется при успешной защите индивидуального задания и наличия некоторых ошибок при ответе на зачете.

Оценка «удовлетворительно» выставляется при выполнении индивидуального задания, наличия ошибок в отчете по его результатам и наличия существенных ошибок при ответе.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если не выполнено индивидуальное задание.

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

Теоретические вопросы (ИОПК 1.1, ИОПК 2.1, ИПК 1.1):

1. Основные понятия гидромеханики: элементарный жидкий объём, плотность, скорость, внутренняя и полная энергия, массовые и поверхностные силы, тензор напряжений, давление, тензор вязких напряжений.

2. Основные уравнения гидромеханики, выражающие физические законы сохранения.

3. Проблема замыкания уравнений гидродинамики. Реологические законы и уравнения состояния. Закон Навье-Стокса.

4. Модель идеального газа. Уравнения и граничные условия.

5. Модель вязкой несжимаемой жидкости. Уравнения и граничные условия.

6. Модель течений газа при малых дозвуковых скоростях («incompressible ideal gas»). Уравнения и граничные условия.

7. Понятие турбулентного течения. Уравнения Рейнольдса. Турбулентные напряжения. Гипотеза Буссинеска для турбулентных течений. Турбулентная вязкость.

8. Гипотеза Буссинеска для турбулентных течений. Уравнения движения и энергии для турбулентных течений с использованием этой гипотезы.

9. Обзор методов моделирования турбулентных течений, основанных на гипотезе Буссинеска.

10. Граничные условия на твердой стенке для турбулентных течений. Пристенные функции.

11. Основные понятия теории разностных схем: аппроксимация, сходимость, устойчивость. Теорема Лакса. Метод конечного объема для построения конечно-разностных схем.

Ответ должен содержать формальную постановку задач.

Информация о разработчиках

Гольдин Виктор Данилович, кандидат физико-математических наук, кафедра вычислительной математики и компьютерного моделирования ММФ ТГУ, доцент.

Курс «**Вычислительная гидроаэродинамика. Часть 1**» разработан при поддержке Регионального научно-образовательного математического центра Томского государственного университета ([НОМЦ ТГУ](#)).