

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

Механико-математический факультет

УТВЕРЖДЕНО:  
Декан ММФ ТГУ  
Л. В. Гензе

Оценочные материалы по дисциплине

**Компьютерный практикум по механике с применением пакета ANSYS Fluent**

по направлению подготовки

**01.04.03 Механика и математическое моделирование**

Направленность (профиль) подготовки :  
**«Механика жидкости, газа и нефтегазотранспортных систем»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Магистр**

Год приема  
**2023**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
А.М. Бубенчиков

Председатель УМК  
Е.А. Тарасов

Томск – 2023

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

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК-2 Способен разрабатывать и применять новые методы математического моделирования в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности.
- ОПК-4 Способен использовать и создавать эффективные программные средства для решения задач механики.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.1 Анализирует математические модели для решения задач в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности.

ИОПК 2.2 Применяет возможности пакетов математических вычислений для задач механики и математического моделирования и обоснованно выбирает средства этих пакетов для решения поставленной задачи.

ИОПК 2.3 Применяет разнообразный математический аппарат на основе сочетания различных методов для описания и анализа физических и математических моделей в процессе научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности.

ИОПК 4.3 Использует различные пакеты программных комплексов вычислительной механики, в том числе для проведения вычислительных экспериментов.

## **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 (ИОПК 2.2).

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 2.2, ИОПК 4.3). В каждой задаче необходимо построить расчетную область и сетку в ней, используя возможности пакета GAMBIT. В пакете FLUENT задать исходные данные и произвести расчет. Примеры задач:

1. Задача о стационарном ламинарном течении глицерина в круглой трубе переменного диаметра.

2. Расчет осесимметричного стационарного течения и теплообмена несжимаемой жидкости в круглой трубе, имеющей сужение.
3. Естественная конвекция от нагретой проволоочки в ламинарном режиме.
4. Турбулентное естественно-конвективное течение в печи с поддувом.
5. Транзвуковое невязкое течение в сопле Лавала.
6. Транзвуковое течение в сопле Лавала с учетом турбулентного пограничного слоя на его стенках. Определение теплового и силового воздействия течения на стенки сопла.
7. Задача о трехмерном турбулентном течении жидкости в смесителе холодной и горячей воды.

Упражнения по представлению результатов расчетов средствами пакета FLUENT (ИОПК 4.3). 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. Контравариантные и физические компоненты векторов и тензоров.
9. Понятия дивергенции и вихря. Их выражения в декартовой и цилиндрической системах координат.
10. Теоремы Стокса и Гаусса-Остроградского в механике жидкости.
11. Ускорение элементарного жидкого объёма, его вычисление в декартовой и цилиндрической системах координат.
12. Производная по времени от интеграла по жидкому объёму.
13. Закон сохранения массы – уравнение неразрывности; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
14. Закон сохранения импульса – уравнение движения; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
15. Уравнение энергии; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
16. Что такое реологические законы и уравнения состояния?
17. Модель идеальной несжимаемой жидкости.
18. Закон Навье-Стокса. Тензор скоростей деформаций.
19. Уравнение движения вязкой жидкости; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
20. Закон Фурье для теплового потока. Уравнение энергии для вязкой жидкости; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.

21. Уравнение состояния сжимаемого газа. Уравнение движения для идеального сжимаемого газа; векторный вид, скалярный вид в декартовой и цилиндрической системах координат.
22. Упрощенные модели сжимаемого газа: приближение Буссинеска, приближение для течений с существенно дозвуковыми скоростями.
23. Интеграл Бернулли для несжимаемой жидкости.
24. Понятие совершенного газа. Интеграл Бернулли для совершенного газа.
25. Инварианты Римана для нестационарных течений совершенного газа.
26. Типы граничных условий для течений жидкости и газа.
27. Понятие турбулентного течения. Уравнения Рейнольдса. Понятие турбулентных напряжений.
28. Гипотеза Буссинеска для турбулентных течений. Понятие турбулентной вязкости.
29. Уравнения движения для турбулентного течения с использованием гипотезы Буссинеска.
30. Уравнения энергии для турбулентного течения с использованием гипотезы Буссинеска.
31. Модель Спалларта-Алмареса для турбулентных течений.
32. «k-ε» модель турбулентности.
33. «k-ω» модель турбулентности.
34. Граничные условия на твердой стенке для турбулентных течений. Пристенные функции.
35. Задание граничных условий для турбулентных течений на внешних границах.
36. Метод конечного объема для построения конечно-разностных схем.
37. 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. Устный экзамен, 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/м<sup>3</sup>, 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 Лавалья с центральным телом в трансзвуковой части.

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

#### Вопросы к экзамену:

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. Модели течений с учетом свободной конвекции (в присутствии силы тяжести).

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

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

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

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

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

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

По результатам защиты отчета и устного ответа на экзамене выставляется оценка (таблица 1).

Таблица 1

Оценка	Критерии соответствия
Отлично	Индивидуальное задание выполнено правильно, отчет оформлен и успешно защищен. При устном ответе на экзамене правильно и развернуто изложен материал вопроса.
Хорошо	Индивидуальное задание выполнено правильно, отчет оформлен и успешно защищен. При устном ответе на экзамене неполно изложен материал.
Удовлетворительно	Индивидуальное задание выполнено правильно, устный экзамен не сдан.
Не удовлетворительно	Не выполнено индивидуальное задание.

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

Теоретические вопросы (ИОПК 2.1, ИОПК 2.3, ИОПК 4.3):

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. Модели течений с учетом свободной конвекции (в присутствии силы тяжести).
7. Модель течений газа при малых дозвуковых скоростях («incompressible ideal gas»). Уравнения и граничные условия.
8. Понятие турбулентного течения. Уравнения Рейнольдса. Турбулентные напряжения. Гипотеза Буссинеска для турбулентных течений. Турбулентная вязкость.
9. Гипотеза Буссинеска для турбулентных течений. Уравнения движения и энергии для турбулентных течений с использованием этой гипотезы.
10. Обзор методов моделирования турбулентных течений, основанных на гипотезе Буссинеска.
11. Граничные условия на твердой стенке для турбулентных течений. Пристенные функции.
12. 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.