

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

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. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

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. Задачи освоения дисциплины

– Знание основных этапов численного моделирования задач механики жидкости и газа с использованием современных пакетов вычислительной гидромеханики, а также основных математических моделей жидких сред.

– Овладеть способами построения геометрии произвольной расчетной области, а также способами построения сеток и оценкой их качества в пакете GAMBIT.

– Уметь выбирать математическую модель решения задачи о течении жидкости или газа, корректно формулировать постановки задач и задавать их параметры в пакете ANSYS FLUENT.

– Уметь выбирать численный метод решения задачи, соответствующий выбранной математической модели, управлять процессом расчета в пакете ANSYS FLUENT, анализировать и представлять результаты расчетов, а также экспортить результаты в другие программы обработки.

– Научиться применять понятийный аппарат теоретической и вычислительной гидромеханики, а также овладеть навыками расчета течений жидкости и газа с использованием пакета ANSYS FLUENT для решения практических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплины (модули)».

Дисциплина относится к обязательной части образовательной программы. Дисциплина входит в модуль Основы для создания Digital Twins.

4. Семестр освоения и форма промежуточной аттестации по дисциплине

Первый семестр, зачет с оценкой

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования по следующим дисциплинам: «Общая физика», «Обыкновенные дифференциальные уравнения», «Уравнения математической физики», «Механика сплошной среды», «Методы приближенных вычислений».

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часов, из которых:

-лекции: 16 ч.

-практические занятия: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Тема 1. Введение.

Этапы решения задач гидродинамики. Основные характеристики течений жидкости и газа.

Тема 2. Математическое моделирование течений жидкости.

Основные математические понятия, используемые при моделировании течений жидкости.

Тема 3. Система уравнений гидродинамики.

Вывод основных уравнений гидродинамики на основе законов сохранения массы, импульса и энергии. Проблема замыкания системы уравнений. Реологические законы и уравнения состояния.

Тема 4. Основные математические модели жидкости, используемые при решении задач гидродинамики.

Модели идеальной и вязкой несжимаемой жидкости. Модель сжимаемой жидкости при малых дозвуковых скоростях. Общие модели идеального и вязкого сжимаемого газа.

Тема 5.

Постановка задач гидродинамики.

Классы задач и типы граничных условий.

Тема 6. Основные понятия численного решения уравнений гидродинамики.

Построение сеток в расчетной области. Дискретизация уравнений и связанные с ней понятия. Обзор методов численного решения уравнений гидродинамики.

Тема 7. Моделирование турбулентных течений.

Уравнения Рейнольдса. Используемые в пакете ANSYS FLUENT модели турбулентных течений. Постановка задач для расчета турбулентных течений.

Тема 8. Геометрический пакет GAMBIT.

Знакомство с геометрическим пакетом GAMBIT. Построение геометрических объектов в пакете GAMBIT. Построение и анализ сеток в пакете GAMBIT.

Тема 9. Знакомство с пакетом ANSYS FLUENT.

Интерфейс пакета. Порядок работы. Этапы решения задач вычислительной гидродинамики в пакете ANSYS FLUENT.

Тема 10. Нестационарное тепловое поле в покоящейся среде.

Постановка и решение задачи о распространении тепла в твёрдом теле с использованием пакета ANSYS FLUENT.

Тема 11. Стационарное ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости в канале.

Постановка и решение задачи о течении глицерина в круглой трубе переменного диаметра с использованием пакета ANSYS FLUENT.

Тема 12. Конвективный теплообмен при течении в канале.

Постановка и решение задачи теплообмена при ламинарном течении несжимаемой жидкости в круглой трубе переменного сечения.

Тема 13 Конвективный теплообмен при турбулентном течении в канале.

Постановка задачи и расчет турбулентного течения в трубе переменного сечения с учетом теплообмена со стенкой, имеющей температуру, отличающую от температуры жидкости.

Тема 14. Моделирование транс- и сверхзвуковых течений сжимаемой жидкости.

Решение задачи о трансзвуковом течении в сопле Лаваля как в невязкой постановке, так и с учетом турбулентного пограничного слоя.

Тема 15. Расчет трехмерных течений.

Решение задачи о трехмерном турбулентном течении в трубе.

Тема 16. Задачи сверхзвукового обтекания.

Решение задачи сверхзвукового обтекания сферы тела вязким потоком газа при ламинарном режиме течения.

Тема 17. Выполнение индивидуального задания.

Постановка индивидуальной задачи расчета течения по выбору студента.
Подготовка и проведение расчета. Подготовка отчета.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, использования вопросов для самоконтроля, контроля работы над индивидуальным заданием и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестре.

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 с оценкой в первом семестре проводится в устной форме по билетам после выполнения и защиты индивидуального задания. Экзаменационный билет содержит один вопрос. Продолжительность зачета с оценкой 1 часа.

Проверка и защита отчета по индивидуальному заданию обучающийся должен продемонстрировать достижения ИОПК 1.1, ИОПК 2.1, ИОПК 2.2, ИПК 1.4.

В процессе зачета при развернутом устном ответе на один теоретический вопрос обучающийся должен продемонстрировать достижения ИОПК 2.1.

Примерный перечень теоретических вопросов:

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 конечноразностных схем.

Результаты зачета с оценкой определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Невыполнение индивидуального задания и отсутствие отчета по его результатам оценивается оценкой «неудовлетворительно» и обучающийся считается не справившимся с учебным материалом. Оценка «удовлетворительно» ставится при выполнении индивидуального задания, наличия ошибок в отчете по его результатам и наличии некоторых существенных ошибок при ответе на зачете. Оценка «хорошо» ставится при успешной защите индивидуального задания, и наличии некоторых ошибок при ответе на зачете. Оценка «отлично» ставится

при успешной защите индивидуального задания, оформлении отчета по заданию и правильном развернутом ответе на зачете.

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 «Moodle» - <https://lms.tsu.ru/course/view.php?id=38219>

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

в) План практических занятий по дисциплине.

1. Знакомство с геометрическим пакетом GAMBIT. Построение геометрических объектов в пакете GAMBIT. Построение и анализ сеток в пакете GAMBIT.

2. Интерфейс пакета FLUENT. Порядок работы. Этапы решения задач вычислительной гидродинамики в пакете FLUENT. Решение нестационарной задачи о распространении тепла в твёрдом теле.

3. Модель вязкой несжимаемой жидкости. Решение задачи о стационарном ламинарном течении вязкой несжимаемой жидкости в канале. Задача теплообмена при ламинарном течении несжимаемой жидкости в канале.

4. Решение задачи о турбулентном течении в трубе переменного сечения с учетом теплообмена со стенкой, имеющей температуру, отличающую от температуры жидкости.

5. Моделирование транс- и сверхзвуковых течений сжимаемой жидкости. Решение задачи о трансзвуковом течении в сопле Лаваля в невязкой постановке и с учетом турбулентного пограничного слоя.

6. Решение задачи о трехмерном течении в трубе.

7. Задача сверхзвукового обтекания затупленного тела вязким потоком газа.

8. Постановка индивидуальной задачи расчета течения по выбору студента. Подготовка и проведение расчета. Подготовка отчета.

г) Методические указания по проведению лабораторных работ.

д) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

– Эглит М.Э. Лекции по основам механики сплошных сред. М.:Ленанд, 2014. 206 с.

– Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.

– 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.

б) дополнительная литература:

– Андерсон Д., Таннхил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х томах. – М.: Мир, 1990.

– 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.

- Моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 143 с.
- Батурин О.В., Батурина 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.
- Батурин О.В., Батурина 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:

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:
 - 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/
 - Фирсов Д.К. Метод контрольного объёма на неструктурированной сетке в вычислительной механике. Учебное пособие. - Кафедра теоретической механики ММФ ТГУ. Томск, 2007. 72 с. http://math.tsu.ru/EEResources/pdf_common/Posobie2.pdf

14. Материально-техническое обеспечение

Для проведения практических занятий и самостоятельной работы используются компьютерные классы учебно-вычислительной лаборатории ММФ, рассчитанные не менее, чем на 12 рабочих мест + рабочее место преподавателя. На компьютерах установлен пакет ANSYS FLUENT, имеется возможность проецирования экрана преподавателя на доску. При выполнении индивидуальных заданий, самостоятельных работ используется свободное и лицензионное программное обеспечение:

- офисный пакет Microsoft Office 2010 (составление отчетов).

15. 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](#)).