

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
аэрокосмических технологий
С.С. Негодяев**

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Математическое моделирование в ракетных двигателях и энергетических установках
по направлению:	Техническая физика
профиль подготовки:	Техническая физика космических летательных аппаратов Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра тепловых процессов
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Зачет

2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: И.В. Лаптев, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры тепловых процессов 04.06.2020

Аннотация

Курс "Математическое моделирование в ракетных двигателях и энергетических установках" относится к вариативной части образовательной программы, изучается на 5 курсе.

Изучение данной дисциплины опирается на знания, полученные в процессе освоения дисциплины "Общая физика", "Математический анализ", "Вычислительная математика", "Уравнения математической физики".

Изучение учебной дисциплины направлено на углубление и расширение базовой профессиональной подготовки магистров, формирование соответствующих компетенций.

В учебной дисциплине рассматриваются основные вопросы принципов и этапов математического моделирования физического явления, классификации расчётных сеток и методы их описания, основные положения конечно-разностного метода и метода контрольных объёмов, основы методов решения систем алгебраических уравнений, методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, методов решения уравнений Навье-Стокса, методы моделирования турбулентных течений жидкости, основы методов моделирования сжимаемых течений жидкости.

Студенты узнают программно-методические средства для генерации, хранения и конвертации расчётных сеток различного типа, численные схемы решения задач тепломассообмена с использованием языков программирования высокого уровня, программно-методические средства для решения систем алгебраических уравнений, информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- формирование знаний и практических навыков математического моделирования физических процессов в РД и ЭУ с использованием современных методов и средств вычислительной гидрогазодинамики.

Задачи дисциплины

- дать студентам теоретические знания в области численных методов решения задач гидрогазодинамики и теплообмена применительно к процессам в РД и ЭУ;
- на примерах и задачах научить студента применять современные методы вычислительной гидрогазодинамики для математического моделирования физических явлений;
- познакомить студента с современными программно-методическими средствами математического моделирования.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-5 Способен осваивать и применять современные физико-математические методы и методы искусственного интеллекта для решения профессиональных задач, составлять практические рекомендации по использованию полученных результатов	ОПК-5.1 Владеет современными расчетно-теоретическими методами, методами компьютерного моделирования и средами разработки программного обеспечения, применяемыми при решении задач в своей профессиональной области
	ОПК-5.2 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, способен обосновать эффективность выбранного метода
ПК-2 Способен самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для оптимизации параметров объектов и процессов с использованием стандартных и	ПК-2.1 Владеет современными физико-техническими методами теоретического и экспериментального исследования
	ПК-2.2 Применяет методы математического анализа и строит математические модели для решения задач оптимизации

процессов с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств

ПК-2.3 Способен самостоятельно планировать и проводить испытания на расчетно-теоретических моделях или экспериментальном оборудовании с применением стандартных и специально разработанных инструментальных и (или) программных средств

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- принципы и этапы математического моделирования физического явления;
- классификацию расчётных сеток и методы их описания;
- основные положения конечно-разностного метода и метода контрольных объёмов.
- основы методов решения систем алгебраических уравнений;
- методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений;
- методов решения уравнений Навье-Стокса;
- методы моделирования турбулентных течений жидкости;
- основы методов моделирования сжимаемых течений жидкости.

уметь:

- использовать программно-методические средства для генерации, хранения и конвертации расчётных сеток различного типа;
- реализовывать численные схемы решения задач тепломассообмена с использованием языков программирования высокого уровня;
- реализовывать и использовать программно-методические средства для решения систем алгебраических уравнений;
- качественно и количественно анализировать полученный результаты;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой реализации численных схем при решении задач тепломассообмена;
- навыками использования программных средств (в том числе свободно распространяемых) сторонних авторов.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Предмет теории математического моделирования	2	2		3
2	Предмет вычислительной гидрогазодинамики	3	3		2
3	Расчётные сетки	2	2		2
4	Конечно-разностный метод	3	3		2
5	Метод контрольных объёмов	3	3		3
6	Решение систем алгебраических уравнений	2	2		3
7	Методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений		6		3
8	Решение уравнений Навье-Стокса		6		3

9	Расчёты на областях сложной конфигурации		6		3
10	Моделирование турбулентных течений		6		3
11	Моделирование течений с учётом сжимаемости		6		3
Итого часов		15	45		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Предмет теории математического моделирования

Математическое моделирование как способ описания физического явления. Задачи и цели. Классификация.

2. Предмет вычислительной гидро- газодинамики

Обзор открытых и коммерческих CFD программ. Достоинства и недостатки методов вычислительной гидро- газодинамики. Этапы создания и свойства численных методов решения задач.

3. Расчётные сетки

Классификация. Основные свойства, достоинства и недостатки структурированных и неструктурированных расчётных сеток. Особенности генерации. Гибридная расчётная сетка. Обзор программ для генерации расчётных сеток.

4. Конечно-разностный метод

Основа метода. Аппроксимация первой, второй и смешанных производных. Ошибки аппроксимации. Аппроксимация граничных условий. Примеры решения задач.

5. Метод контрольных объёмов

Запись законов сохранения в интегральной форме. Аппроксимация поверхностных и объёмных интегралов. Аппроксимация граничных условий. Численная схема решения уравнения переноса величины. Примеры решения задач.

6. Решение систем алгебраических уравнений

Прямые методы. Итерационные методы. Сходимость итерационных методов. Примеры реализации методов решения систем алгебраических уравнений. Использование сторонних программных средств.

Семестр: 2 (Весенний)

7. Методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений

Классификация методов решения ОДУ. Методы типа Рунге-Кутты. Многоточечные методы. Явные и неявные методы аппроксимации нестационарного уравнения переноса величины. Примеры решения задач.

8. Решение уравнений Навье-Стокса

Система уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости в дифференциальной и интегральной формах. Выбор расчётной сетки. Методы расчёта давления. Методы типа SIMPLE. Решение уравнений в переменных «вихрь-функция тока». Примеры решения задач.

9. Расчёты на областях сложной конфигурации

Выбор расчётной сетки и способа локализации узлов сетки. Блочнo-структурированные сетки. Конечно-разностный метод в криволинейных координатах. Метод контрольных объёмов на расчётных сетках произвольной формы. Постановка граничных условий.

10. Моделирование турбулентных течений

Характеристики турбулентных течений. Усреднение по Рейнольдсу. Турбулентный перенос. Классические типы турбулентных течений. Профиль скорости в турбулентном пограничном слое. Турбулентная вязкость и методы её моделирования. Граничные условия на твёрдой стенке и на свободных границах. Обзор методов LES, DNS и DES.

11. Моделирование течений с учётом сжимаемости

Особенности решения системы уравнений движения сжимаемой среды. Постановка граничных условий. Разрывы течения. Обзор методов сквозного счёта. Схемы типа Годунова.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. J. H. Ferziger, M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2002
2. C. Hirsch, Numerical Computation of Internal and External Flows, Elsevier London, 2007.
3. Патанкар С., Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости, Москва «Энергоатомиздат», 1984.
4. Годунов С.К. и др, Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
5. Формалёв В.Ф., Ревизников Д.Л., Численные методы, Физматлит, 2004.
6. Пирумов У.Г., Росляков Г.С., Газовая динамика сопел, М.: Наука, 1990.
7. Гильманов А.Н., Методы адаптивных сеток в задачах газовой динамики, Физматлит, 2000.

Дополнительная литература

1. Численные методы [Текст] : учебное пособие для вузов / У. Г. Пирумов; Допущено М-вом образования РФ .— М. : Дрофа, 2004 .— 224 с.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. www.paraview.org;
2. www.cgal.org;
3. www.hpfem.jku.at/netgen;
4. www.wias-berlin.de/software/tetgen;
5. www.cgns.sourceforge.net/WhatIsCGNS.html;

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

программное обеспечение: MS Visual Studio 2013, ParaView, boost, Eigen 3.2.2, Tetgen, Netgen, CGNS.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Успешное освоение курса «Математическое моделирование в РД и ЭУ» требует самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, семинаров, учебной и научной литературе);
- реализация численных схем решения примеров задач;
- решение задач с использованием стороннего программного обеспечения;
- подготовку к контрольным, самостоятельным работам и тестам;
- тематические лекции студентов на заданную тему.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Техническая физика
профиль подготовки:	Техническая физика космических летательных аппаратов Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра тепловых процессов
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: И.В. Лаптев, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-5 Способен осваивать и применять современные физико-математические методы и методы искусственного интеллекта для решения профессиональных задач, составлять практические рекомендации по использованию полученных результатов	ОПК-5.1 Владеет современными расчетно-теоретическими методами, методами компьютерного моделирования и средствами разработки программного обеспечения, применяемыми при решении задач в своей профессиональной области
	ОПК-5.2 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, способен обосновать эффективность выбранного метода
ПК-2 Способен самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для оптимизации параметров объектов и процессов с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств	ПК-2.1 Владеет современными физико-техническими методами теоретического и экспериментального исследования
	ПК-2.2 Применяет методы математического анализа и строит математические модели для решения задач оптимизации
	ПК-2.3 Способен самостоятельно планировать и проводить испытания на расчетно-теоретических моделях или экспериментальном оборудовании с применением стандартных и специально разработанных инструментальных и (или) программных средств

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Математическое моделирование в ракетных двигателях и энергетических установках» обучающийся должен:

знать:

- принципы и этапы математического моделирования физического явления;
- классификацию расчётных сеток и методы их описания;
- основные положения конечно-разностного метода и метода контрольных объёмов.
- основы методов решения систем алгебраических уравнений;
- методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений;
- методов решения уравнений Навье-Стокса;
- методы моделирования турбулентных течений жидкости;
- основы методов моделирования сжимаемых течений жидкости.

уметь:

- использовать программно-методические средства для генерации, хранения и конвертации расчётных сеток различного типа;
- реализовывать численные схемы решения задач тепломассообмена с использованием языков программирования высокого уровня;
- реализовывать и использовать программно-методические средства для решения систем алгебраических уравнений;
- качественно и количественно анализировать полученный результаты;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой реализации численных схем при решении задач тепломассообмена;
- навыками использования программных средств (в том числе свободно распространяемых) сторонних авторов.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Текущий контроль осуществляется в форме самостоятельных работ или тестов в письменной форме, а так же устных опросов по каждой теме.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также индивидуальных консультаций.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Аттестация по дисциплине «Математическое моделирование в ракетных двигателях и энергетических установках» осуществляется в форме зачёта (осенний семестр) и дифференцированного зачёта (весенний семестр).

Примерный перечень вопросов к зачету:

1. Классификация расчётных сеток;
2. Основа конечно-разностного метода. Аппроксимация первой, второй и смешанных производных;
3. Метод контрольных объёмов. Аппроксимация поверхностных и объёмных интегралов.
4. Прямые и итерационные методы решения систем линейных алгебраических уравнений.
5. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений.
6. Методы типа SIMPLE решения уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости.
7. Моделирование турбулентности. Модели турбулентной вязкости.
8. Моделирование течений сжимаемой жидкости.

Примерный перечень контрольных заданий к дифференцированному зачету:

1. Решить одномерное стационарное конвективно-диффузионное уравнения с граничными условиями Дирихле на обоих концах расчётной области;
2. Решить стационарное одномерное уравнение теплопроводности в сферических координатах;
3. Решить нестационарное уравнение теплопроводности в квадратной области при заданных условиях на границе;
4. Решить двумерное уравнение переноса скалярной величины методом контрольных объёмов при заданном поле скорости;
5. Рассчитать нестационарное течение вязкой несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска с использованием переменных «вихрь-функция тока»;
6. Решить нестационарную одномерную систему уравнений Эйлера для сжимаемого газа методом Куранта-Изаксона-Риса.

Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных работ;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных работ;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных работ;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, а также, если во время ответа экзаменационного билета, он показал что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Зачёт выставляется студенту, показавшему твёрдое знание материала 1-го семестра, имеющего положительные оценки за текущий контроль, устные опросы.

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку ответов на полученные вопросы. Опрос обучающегося по полученным и дополнительным вопросам на зачете не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения зачета при подготовке ответов на вопросы, обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами семинаров и любой другой литературой.

Во время проведения зачета при ответе обучающегося на полученные и дополнительные вопросы по программе дисциплины, он не может пользоваться конспектами семинаров и любой другой литературой.