

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева»
Отдел аспирантуры
Кафедра «Авиационные двигатели»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
докт. техн. наук, профессор
_____ Т.Д. Кожина
« ___ » _____ 20__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

По дисциплине

«Численные методы решения задач аэродинамики

и теплообмена в ГТД»

для аспирантов очной формы обучения по специальности
05.07.05 Тепловые, электроракетные
двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

| Виды занятий | Кол-во часов | Кол-во зачётных единиц |
|-----------------------|---------------------|-------------------------------|
| Лекции | 10 | 0,28 |
| Практические занятия | 8 | 0,22 |
| Самостоятельн. работа | 18 | 0,5 |
| Всего часов | 36 | 1,0 |
| Форма контроля | зачёт | |

Программу составил:

Профессор кафедры «Авиадвигатели», д.т.н. Е.Н. Богомолов _____

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры
«Авиационные двигатели», протокол № 5 от 27 декабря 2011 г.

Зав. кафедрой «Авиационные двигатели»
д.т.н., профессор М.Л. Кузменко _____

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА КУРСА

«Численные методы решения задач аэродинамики и теплообмена в ГТД»

Настоящая программа составлена на основании федеральных государственных требований к структуре основной профессиональной образовательной программы послевузовского профессионального образования, утверждённых приказом министерства образования и науки Российской Федерации от 16 марта 2011 г. № 1365, паспорта специальности и учебного плана специальности 05.07.05 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, утверждённого ректором РГАТА имени П.А. Соловьёва. Данный курс изучается аспирантами очной и заочной форм обучения.

Цель преподавания дисциплины: дать необходимые сведения о содержании и особенностях современных численных методов, применяемых для решения задач газовой динамики и теплообмена.

Задачи изучения дисциплины:

- ознакомление с общими свойствами численных методов;
- ознакомление с содержанием и свойствами метода конечных разностей для дифференциальных уравнений в частных производных;
- ознакомление с современными подходами к решению задач турбулентного течения.

Процесс изучения дисциплины рекомендуется построить следующим образом. В начале учебного семестра, до начала лекционных и практических занятий, следует получить консультации научного руководителя о месте и роли диссертационной работы аспиранта в иерархии задач современного газотурбинного двигателестроения, о средствах и методах решения поставленной задачи диссертационного исследования.

В ходе аудиторных занятий будут изложены основные положения курса, выявлена и обоснована взаимосвязь всех разделов, даны рекомендации по изучению каждого из разделов, предложена литература как для первоначального, так и для углублённого изучения дисциплины.

Индивидуальные практические занятия должны состоять в адаптации изложенных на аудиторных занятиях общих методов и

подходов к обоснованию и решению конкретной диссертационной задачи. Эти адаптированные материалы должны быть использованы при написании программы диссертационного исследования.

Итоговая аттестация по курсу «Вычислительные методы газовой динамики» проходит в виде защиты программы диссертационного исследования и зачёта по теоретической части курса.

СОДЕРЖАНИЕ (ПРОГРАММА) ДИСЦИПЛИНЫ.

1. Лекционные занятия:

Лекционные занятия (соответствуют конспекту лекций Е.Н. Богомолов «Численные методы гидрогазодинамики»: учебное пособие.– Рыбинск: РГАТА имени П.А. Соловьева, 2010.– 92с., страницы которого указаны для каждого раздела лекций, где изложен соответствующий материал)

1.1. Введение. Перечень и характеристика основных универсальных численных методов на примере решения алгебраического неявного уравнения и интегрирования (1 час, стр.4-9)

1.2. Численное интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений (1 час, стр. 10-14)

1.3. Конечноразностное представление уравнения теплопроводности и его решение методом Монте – Карло (2 часа, стр. 15-23)

1.4. Типы уравнений в частных производных на примере основного уравнения газовой динамики. Решение уравнения Лапласа методом конечных разностей. Метод Либмана. Уравнение Пуассона для вторичных течений (2 часа, стр. 24-42)

1.5. Особенности численного решения параболических и гиперболических дифференциальных уравнений. Дивергентная форма уравнений (на примере уравнения движения Эйлера). Модельные представления для уравнения Навье – Стокса. Схемная вязкость. Проблема нелинейности (2 часа, стр. 43-55)

1.6. Основное содержание и особенности применения метода конечных разностей. Выбор сетки. Аппроксимация дифференциальных

соотношений. Погрешность аппроксимации. Явные неявные схемы. Метод прогонки. Метод установления (1 час, стр. 56-71)

1.7. Подходы к решению задач турбулентного течения жидкости. Уравнения движения жидкости в напряжениях, Навье – Стокса. Уравнение Рейнольдса. Турбулентные напряжения. Турбулентная вязкость. Модели турбулентности. Прямое моделирование. Моделирование крупных вихрей (1 час, стр. 72-87)

2. Практические занятия (семинары).

2.1 Вычисление e^x и e^{-y} путем разложения в ряд Тейлора. Проверка устойчивости алгоритма. (1 час)

2.2 Проверка сходимости уравнения $x = f(x) = y$. Определение показателя профиля скорости n на основании уравнения (1 час)

$$Re = \frac{4}{xn(n+1)(n+2)} \exp[2(n+1) + 1/n + xC_1].$$

2.3 Решение уравнения $y' = y$ методом Рунге – Кутта. Определение порядка согласования с рядом Тейлора. (1 час)

2.4 Аппроксимация 1-ой и 2-ой производных с помощью центральных разностей. Оценка погрешности ограничения. (1 час)

2.5 Пример решения уравнения Лапласа для квадратной области при $m=n=3$ методом Либмана. (1 час)

2.6 Расчетный анализ точности и устойчивости уравнения

$$\mu_i^{n+1} = (1 - C_0)\mu_i^n + C_0\mu_{i-1}^n,$$

аппроксимирующего в явной формуле уравнение $\frac{\partial \mu}{\partial t} + a \frac{\partial \mu}{\partial x} = 0$, при разных значениях числа Куранта C_0 . (1 час)

2.7 Определение схемной вязкости для уравнения

$\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} = 0$, аппроксимированного с разностью вперед. (1 час)

2.8 Решение системы уравнений соответствующей неявной схеме аппроксимации уравнения $\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$, методом прогонки. (1 час)

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Е.Н. Богомолов «Численные методы гидрогазодинамики»: учебное пособие.–Рыбинск: РГАТА имени П.А. Соловьева, 2010.– 92с. 150

Дополнительная литература:

1. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: «Наука». 1984. 520 с. нет
2. Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные схемы газовой динамики. – М.: «Наука». 1975. 352 с. 2
3. Данилина Н. И., Дубровская Н. С., Кваша О. П. и др. Численные методы. М.: «Высшая школа». 1976. 368 с. нет
4. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Численные методы газовой динамики. М.: «Высшая школа». 1987. 232 с. нет
5. Вержбицкий В. М. Основы численных методов. М.: «Высшая школа». 2002. 840 с. 50
6. Самарский А.А. Введение в численные методы. – С.-Пб.: Лань, 2005. – 288 с. 2

Периодические издания (журналы):

1. Полёт.
2. Газотурбинные технологии.
3. Энергетика.
4. Турбины и дизели.
5. Известия вузов. Авиационная техника.
6. Вестник СГАУ.

7. Вестник РГАТА.

Большинство приведённых в данном списке учебников, учебных пособий, научных монографий и периодических изданий можно найти в фондах библиотеки РГАТА имени П.А.Соловьёва. При изучении курса «Вычислительные методы газовой динамики» допускается использовать и другие учебные и научные издания, включая материалы профильных научно – технических конференций и ресурсы электронных библиотек и каталогов, материалы выставок, салонов и других форумов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЧЁТУ.

1. Понятие о численном методе. В чем состоят общие свойства численного решения уравнения $f(x, y) = 0$ и численного метода нахождения определенного интеграла?
2. Опишите метод Рунге– Кутта численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений с методом Эйлера для аналогичной задачи.
3. Постройте дифференциальное уравнение для задачи одномерного переноса и укажите его конечно – разностное представление.
4. Укажите расчетную формулу для определения переносимой субстанции в рамках конечно – разностного метода. Введите число Куранта.
5. Прокомментируйте зависимость от числа Куранта характеристик переноса, определяемых на основании конечно – разностного уравнения.
6. Сущность моделирования процессов переноса методом Монте – Карло.
7. Вероятностная трактовка уравнения теплопроводности в конечно – разностной форме.
8. Метод случайного блуждания для уравнения переноса в конечно – разностной форме.
9. Вероятностное толкование граничных условий теплоотдачи.
10. Преобразование дифференциального уравнения типа уравнения теплопроводности к конечно – разностной форме.
11. Классификация дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. Принципиальные особенности их численной реализации.

12. Что такое основное уравнение газовой динамики? На какие типы дифференциальных уравнений распадается это уравнение в зависимости от числа Маха потока?
13. Запишите уравнение Лапласа в конечно – разностной форме. Сформулируйте задачу Дирихле для этого уравнения, составьте расчетную сетку и переведите конечно – разностную форму в индексную.
14. Как определить погрешность ограничения при конечно – разностном представлении первой производной?
15. Опишите метод исключения Гаусса для решения системы алгебраических уравнений первой степени.
16. Опишите итерационный метод Гаусса – Зейделя для решения системы алгебраических уравнений первого порядка. Укажите условия устойчивости метода.
17. В чем смысл использования дивергентной формы дифференциальных уравнений? Что означает консервативность уравнений в конечно – разностной форме?
18. Сущность конечно – разностных методов решения задач газодинамики.
19. Особенности аппроксимации дифференциальных выражений.
20. Что такое дискретизация задачи и в чем заключается ее проверка?
21. Поясните понятия сходимости и устойчивости конечно – разностной схемы.
22. Понятие о схемной вязкости. Ее анализ методом дифференциальных приближений.
23. Как преодолевается трудность численных решений для нелинейных уравнений?
24. Явные и неявные схемы конечно – разностной аппроксимации дифференциальных выражений, их влияние на устойчивость вычислений.
25. В чем состоит смысл применения метода установления?
26. Опишите метод прогонки для системы алгебраических уравнений трехдиагонального типа.
27. На основании какого закона природы выводятся уравнения движения жидкости в напряжениях? Как записываются эти уравнения?
28. На основании какой гипотезы уравнения в напряжениях для потока жидкости преобразуются в уравнения Навье – Стокса? Каков вид этих уравнений для несжимаемой жидкости?
29. Поясните понятие турбулентного течения жидкости.
30. Представление параметров и характеристики турбулентного течения жидкости.

31. Уравнения Рейнольдса для турбулентного течения жидкости.
32. Пульсационные составляющие скорости и турбулентные напряжения в потоке жидкости.
33. Гипотеза Буссинеска для учета турбулентных напряжений.
34. Основные группы моделей турбулентности.
35. Модель Прандтля для турбулентной вязкости.
36. $K-l$ модель турбулентности Прандтля – Колмогорова.
37. Понятие о кинетической энергии турбулентности и ее диссипации. Роль крупномасштабной и мелкомасштабной турбулентности.
38. $K - \varepsilon$ модель турбулентности. Модельные уравнения для K и ε .
39. Выражение для турбулентной вязкости через кинетическую энергию турбулентности K и скорость ее диссипации ε .
40. Ограничения применимости $K - \varepsilon$ - модели турбулентности и модификаций этой модели.