

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Драгунов В.К.

« 16 » июня 2015 г.

Программа аспирантуры

Направление 03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (специальность) 01.04.14 Теплофизика и теоретическая
теплотехника

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины по выбору

«Численные методы расчета и моделирование тепломассообменных
процессов в современном энергетическом и промышленном оборудовании»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ДВ.2.2

Всего: 108 часов

Семестр 3, в том числе

6 часов – контактная работа,
84 часа – самостоятельная работа,
18 часов – контроль

Программа составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, утвержденного приказом Минобрнауки России от 30.07 2014 г. № 867 и паспорта специальности 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника, номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 25 февраля 2009 г. № 59.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины является изучение методов математического и численного моделирования сложных процессов тепломассообмена в разнообразных конструкциях, практическое освоение современных методов численного моделирования и компьютерных кодов для разработки и верификации более совершенных математических моделей и методов расчета на основе отечественного и мирового уровня развития.

Задачами дисциплины являются:

- освоение методов и средств математического и численного моделирования сложных процессов тепломассообмена в современном энергетическом и промышленном оборудовании;
- обучение навыкам разработки и верификации компьютерных кодов численного моделирования;
- обучение навыкам обоснования и принятия решения при выборе методов численного моделирования на основе отечественного и мирового уровня развития.

В процессе освоения дисциплины **формируются следующие компетенции:**

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной

области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

– готовность к обоснованному выбору предмета самостоятельных научных исследований в области теплофизики и теоретической теплотехники (ПК-1);

– готовность решать задачи аналитического характера в области теплофизики и теоретической теплотехники, предполагающие выбор и многообразие актуальных способов их решения (ПК-2);

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать **следующие результаты образования:**

знать:

– содержание и математическое выражение законов сохранения массы, импульса, энергии и массы отдельного компонента в движущейся многокомпонентной сплошной среде (ПК-1);

– специфику численных методов применяемых для решения задач гидродинамики, тепло- и массообмена в современном энергетическом и промышленном оборудовании (ПК-1);

уметь:

– составлять алгоритм решения поставленной задачи, запрограммировать его или подобрать уже известный программный продукт для моделирования сложных процессов тепломассообмена (ПК-2);

– использовать современные и перспективные компьютерные и информационные технологии параллельных вычислений для решения многомерных задач тепломассообмена (ОПК-1);

владеть:

– методами моделирования высоко- и низкотемпературных теплогидравлических процессов в конкретных технических системах и математическими моделями элементов, работающих на различных физических принципах (ПК-2);

– навыками использования пакетов прикладных программ моделирования и создания программных продуктов для моделирования процессов и систем (УК-1).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Математическое описание процессов теплообмена.

Законы сохранения массы, импульса, энергии, массы компонента в смеси как частные случаи общего закона сохранения. Обобщенное уравнение переноса (ОУП), выражающее закон сохранения в дифференциальной форме. Физический смысл отдельных членов ОУП. Особенности системы уравнений Навье-Стокса, записанной в естественных переменных, с позиций их численного решения. Решение уравнений гидродинамики в переменных «завихренность — функция тока». Получение уравнения Пуассона для давления. Преимущества и недостатки численного решения уравнений гидродинамики, записанных относительно различных переменных.

2. Краткая характеристика численных методов решения ОУП. Получение дискретного аналога для ОУП методом контрольного объема.

Методы конечных разностей, взвешенных невязок, вариационный метод. Физический смысл и достоинства консервативного метода контрольного объема (МКО) как частного случая метода взвешенных невязок. Дискретизация пространства и времени. Методы построения расчетной сетки. Узловые точки и грани контрольных объемов (КО). Интегрирование ОУП по КО и интервалу времени. Выбор базисных (интерполяционных) функций. Явные и неявные схемы. Линеаризация источникового члена ОУП. Влияние способа линеаризации на устойчивость численного решения. Физический смысл обратной отрицательной связи. Проблема аппроксимации компонент вектора плотности полного потока соответствующего удельного свойства на гранях КО.

3. Нестационарные задачи конвекции и диффузии при заданном поле скорости. Методы расчета поля скорости.

Центрально-разностная схема и схема с разностями «против потока» для аппроксимации компонент вектора полного потока на гранях КО. Решение ОУП с разрывными коэффициентами для одномерной стационарной задачи конвекции и диффузии. Устойчивость численных схем. Локально-одномерные аппроксимации для компонент вектора полного потока в

многомерных задачах. Дискретный аналог ОУП для задач конвекции и диффузии. Алгоритм SIMPLE. Уравнение для поправки давления. Краевые условия для поправки давления. «Мягкие» выходные условия. Особенности алгоритмов SIMPLER, SIMPLEC, PISO. Метод нижней релаксации для получения сходящегося решения. Схемная диффузия. Причины возникновения схемной диффузии. Методы подавления схемной диффузии. Методы решения сопряженных задач тепломассообмена в областях сложной геометрической формы. Метод блокированных контрольных объемов. Аналогия между итерационным методом и методом установления при решении стационарных задач гидродинамики и тепломассообмена.

4. Пакеты прикладных программ для решения задач тепломассообмена (CFD-коды).

История создания CFD-кодов, их классификация. Архитектура современных CFD-кодов: Препроцессор, Генератор сетки, Решатель (Солвер), Постпроцессор. Открытые и коммерческие CFD-коды. Краткая характеристика открытого кода OpenFOAM. Представление полей искомых переменных. Структурное хранение сеточных переменных и неструктурная сетка. Неструктурное хранение в виде дерева.

5. Методы решения систем уравнений — дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений.

Метод поправки и отложенной коррекции. Линейные «солверы» при структурном хранении сеточных переменных. Линейные «солверы» при неструктурном хранении. Параллельные вычисления. Методы распараллеливания. Декомпозиция расчетной области. Инструменты для параллельного программирования OpenMP и MPI.

6. Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области.

Криволинейные системы координат. Многоблочные сетки. Адаптивные сетки. Полностью неструктурные сетки. Дробные КО.

7. Работа с кодом ANES.

Архитектура кода. Классы моделируемых задач тепломассообмена. Используемые расчетные сетки для описания геометрически сложных объектов. Описание физических свойств веществ, включая коэффициенты переноса. Задание источниковых членов. Задание краевых условий. Выбор

реализованных в коде алгоритмов и математических моделей. Мониторинг процесса решения. Представление результатов расчета.

8. *Турбулентные течения. Математические модели для турбулентной вязкости. Модели для рейнольдсовых напряжений и компонент вектора плотности турбулентного потока теплоты и массы.*

Краткий обзор экспериментальных данных о структуре турбулентных течений. Пристеночная турбулентность. Проблемы численного моделирования турбулентности. Методы прямого моделирования турбулентных течений (DNS). Моделирование крупных вихрей (LES). Классификация математических моделей турбулентности. Алгебраические, одно- и многопараметрические модели. Стандартная диссипативная k-ε модель турбулентности для высоких турбулентных чисел Рейнольдса. Метод пристеночных функций. Современные k-ε модели для низких турбулентных чисел Рейнольдса. Дифференциальные модели. Аппроксимация диффузионных и источниковых членов. Алгебраические модели Лондера.

ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины: 3 семестр – дифференцированный зачет.

Вопросы для самоконтроля и для проведения зачета

1. Законы сохранения массы, импульса, энергии, массы компонента в смеси как частные случаи общего закона сохранения.
2. Обобщенное уравнение переноса (ОУП), выражающее закон сохранения в дифференциальной форме. Физический смысл отдельных членов ОУП.
3. Особенности системы уравнений Навье-Стокса, записанной в естественных переменных, с позиций их численного решения.
4. Решение уравнений гидродинамики в переменных «завихренность — функция тока».
5. Преимущества и недостатки численного решения уравнений гидродинамики, записанных относительно различных переменных.
6. Метод конечных разностей.

7. Метод взвешенных невязок.
8. Вариационный метод.
9. Физический смысл и достоинства консервативного метода контрольного объема (МКО).
10. Дискретизация пространства и времени в МКО. Методы построения расчетной сетки. Узловые точки и грани контрольных объемов.
11. Интегрирование ОУП по КО и интервалу времени.
12. Выбор базисных (интерполяционных) функций.
13. Явные и неявные схемы МКО.
14. Линеаризация источникового члена ОУП. Влияние способа линеаризации на устойчивость численного решения.
15. Проблема аппроксимации компонент вектора плотности полного потока соответствующего удельного свойства на гранях КО.
16. Центральная-разностная схема и схема с разностями «против потока» для аппроксимации компонент вектора полного потока на гранях КО.
17. Решение ОУП с разрывными коэффициентами для одномерной стационарной задачи конвекции и диффузии.
18. Устойчивость численных схем.
19. Дискретный аналог ОУП для задач конвекции и диффузии.
20. Алгоритм SIMPLE. Уравнение для поправки давления. Краевые условия для поправки давления. «Мягкие» выходные условия.
21. Особенности алгоритмов SIMPLER, SIMPLEC, PISO. Метод нижней релаксации для получения сходящегося решения.
22. Схемная диффузия. Причины возникновения схемной диффузии. Методы подавления схемной диффузии.
23. Методы решения сопряженных задач тепломассообмена в областях сложной геометрической формы.
24. Метод заблокированных контрольных объемов.
25. Аналогия между итерационным методом и методом установления при решении стационарных задач гидродинамики и тепломассообмена.

26. Классификация CFD-кодов и их архитектура. Открытые и коммерческие CFD-коды.
27. Открытый код OpenFOAM.
28. Методы решения систем уравнений — дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений. Метод поправки и отложенной коррекции.
29. Линейные «солверы» при структурном хранении сеточных переменных.
30. Линейные «солверы» при неструктурном хранении.
31. Параллельные вычисления. Методы распараллеливания. Декомпозиция расчетной области.
32. Инструменты для параллельного программирования OpenMP и MPI.
33. Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области. Криволинейные системы координат. Многоблочные сетки. Адаптивные сетки. Полностью неструктурные сетки. Дробные КО.
34. Особенности моделирования в коде ANES.
35. Структура турбулентных течений. Пристеночная турбулентность. Проблемы численного моделирования турбулентности.
36. Методы прямого моделирования турбулентных течений (DNS).
37. Моделирование крупных вихрей (LES).
38. Классификация математических моделей турбулентности.
39. Алгебраические, одно- и многопараметрические модели.
40. Стандартная диссипативная k-ε модель турбулентности для высоких турбулентных чисел Рейнольдса. Метод пристеночных функций.
41. Современные k-ε модели для низких турбулентных чисел Рейнольдса.
42. Алгебраические модели Лондера.

Критерии оценки за освоение дисциплины определены в Инструктивном письме И-23 от 14 мая 2012 г.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях : учебное пособие для вузов по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / В. В. Ягов . – М. : Изд. дом МЭИ, 2014 . – 542 с. - ISBN 978-5-383-00854-6.
2. Фундаментальные проблемы моделирования турбулентных и двухфазных течений : в 2 т. / Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ) Рос. акад. наук, Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе ; Ред. А. А. Саркисов, Г. А. Филиппов . – М. : Наука, 2010 . - ISBN 978-5-02-037475-1 .
3. MATLAB и Simulink в электроэнергетике : справочник / В. П. Дьяконов, А. А. Пеньков . – М. : Горячая Линия-Телеком, 2009 . – 816 с. - ISBN 978-5-9912011-4-8 .
4. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB : учебное пособие / С. В. Поршнева . – 2-е изд., испр . – СПб. : Лань, 2011 . – 736 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература) . - ISBN 978-5-8114-1063-7 .
5. Кн.1 : Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы / М. С. Алхутов, и др. ; Общ. ред. А. В. Клименко, В. М. Зорин . – 2007 . – 528 с. - ISBN 978-5-383-00016-8 .

Дополнительная литература:

6. Кн.2: Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / А. А. Александров, и др. ; Общ. ред. А. В. Клименко, В. М. Зорин . – 2007 . – 564 с. - ISBN 978-5-383-00017-5 .
7. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах : пер. с англ. / С. В. Патанкар . – М. : Изд-во МЭИ, 2003 . – 312 с. - ISBN 5-7046-0898-1 .

ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

1. Интернет-ресурс. OpenFOAM. Открытое программное обеспечение, реализующее CFD-коды. <http://www.openfoam.com/>
2. Интернет-ресурс. Среда численного моделирования для научных исследований ANES (открытое программное обеспечение). <ftp://itf.mpei.ac.ru/>
3. Реферативные базы данных научного цитирования SCOPUS (<http://www.scopus.com>), WEB OF SCIENCE (<http://webofknowledge.com>), РИНЦ (<http://elibrary.ru>).

ЛИЦЕНЗИОННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

1. Программное обеспечение MATLAB.