

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

04 2022 г.



Рабочая программа факультативной дисциплины
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В МЕХАНИКЕ ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ
программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
по научной специальности 1.3.9 Физика плазмы

Принята решением Ученого совета
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа факультативной дисциплины «Численные методы в механике жидкости, газа и плазмы» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.9 Физика плазмы (далее – программа аспирантуры)

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями изучения дисциплины являются:

- углубление знаний в области общих принципов построения и исследования разностных схем для уравнений в частных производных, применительно как к модельным уравнениям гидрогазодинамики;

- получение знания современных методов численного решения задач динамики вязкой жидкости;

- приобретение устойчивых навыков и практического опыта численного исследования типичных задач гидрогазодинамики, выбора и обоснования численных схем и численных граничных условий, построения адекватных расчетных сеток, составления программных кодов и их тестирования, получения сеточно-независимого решения, анализа результатов и их трактовки.

Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

2.1. Дисциплина «Численные методы в механике жидкости, газа и плазмы» входит в факультативную часть программы аспирантуры с целью расширения и углубления научных и прикладных знаний аспирантов и организуется по выбору и желанию аспиранта.

2.2. Данная программа строится на преемственности программ в системе высшего образования и предназначена для аспирантов ФТИ им. А.Ф. Иоффе, прошедших обучение по программе подготовки магистров, прослушавших соответствующие курсы и имея по ним положительные оценки. Она основывается на положениях, отраженных учебных программах указанных уровней.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут:

знать: основные понятия конечно-разностных численных методов решения уравнений в частных производных, методы численного решения уравнений Прандтля и Навье - Стокса;

уметь: разрабатывать на основе указанных методов эффективные вычислительные программы для типичных задач динамики вязких газов и жидкостей;

владеть опытом: применения указанных методов.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

Приводимая ниже таблица показывает распределение бюджета учебного времени, отводимого на освоение основных разделов курса согласно учебному плану.

Наименование разделов и тем	Трудоемкость (в ЗЕТ)	Объем работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
			лекции	Лаб. / практ	самостоятельная работа	контроль
1	2	3	4	5	6	7
Раздел 1. Классические" методы численного моделирования течений сплошной среды						
Тема 1.1 Методы численного решения уравнений Эйлера динамики невязкого газа		20	8		12	
Тема 1.2. Методы численного интегрирования системы уравнений Навье-Стокса для течений совершенного однородного газа		20	8		12	
Тема 1.3. Вычислительные граничные условия		20	8		12	
Всего по разделу		60	24		36	
Раздел 2. Современные противопоточные методы численного интегрирования уравнений гидрогазодинамики						
Тема 2.1. Методы расщепления матрицы коэффициентов (РМК) и расщепления векторов газодинамических потоков (РВП)		20	8		12	
Тема 2.2. Структура современных неявных алгоритмов реализации противопоточных методов решения уравнений гидрогазодинамики		20	8		12	
Всего по разделу		40	16		24	
Раздел 3. Метод конечных объемов для гидродинамических расчетов в областях сложной геометрии						
Тема 3.1. Метод конечных объемов (КО) для расчета стационарных течений несжимаемой жидкости		22	7		15	
Тема 3.2. Метод конечных объемов для расчета нестационарных течений несжимаемой жидкости		22	7		15	
Всего по разделу		44	14		30	
Всего по дисциплине	4	144	54		90	за- чет

Раздел 1. Классические" методы численного моделирования течений сплошной среды

Тема 1.1. Методы численного решения уравнений Эйлера динамики невязкого газа

Общая характеристика существующих методов численного решения уравнений Эйлера. Схемы Лакса-Вендроффа и Мак-Кормака. Метод характеристик для одномерных нестационарных задач газовой динамики. Выделение разрывов. Сеточно-характеристические методы. Метод С.К.Годунова. Модификация В.М.Колгана для повышения порядка аппроксимации. Кусочно-линейное и кусочно-параболическое представление поведения функции. Стационарный аналог метода С.К.Годунова. Энтропийные условия и условия монотонности. TVD-схемы второго порядка точности. Маршевый метод А.В.Родионова.

Тема 1.2. Методы численного интегрирования системы уравнений Навье-Стокса для течений совершенного однородного газа

Краткий исторический обзор и общая характеристика методов решения полных уравнений Навье-Стокса (Рейнольдса). Необходимость применения неявных методов при расчете пристенных течений. Неявная факторизованная схема (метод Бима -Уорминга). Неявные методы постоянного направления. Явно-неявный метод Мак Кормака. Особенности реализации методов при использовании произвольных криволинейных систем координат. Достоинства и недостатки рассмотренных методов.

Тема 1.3. Вычислительные граничные условия

Понятие корректности начально-краевой задачи. Постановка граничных и начальных условий для систем линейных уравнений. Собственные числа и собственные векторы гиперболических систем, преобразование подобия. Характеристики, характеристическая форма записи гиперболических систем, условия совместности на характеристиках. Корректность постановки начально-краевой задачи для случая одномерных нестационарных квазилинейных гиперболических систем, обобщение на случай многомерных уравнений. Граничные условия и граничные аппроксимации. Собственные числа и собственные векторы для уравнений Эйлера. Способы задания граничных условий и аппроксимаций на входных и выходных границах при расчете течений различных типов. Построение "неотражающих" граничных условий.

Раздел 2. Современные противопоточные методы численного интегрирования уравнений газодинамики

Тема 2.1. Методы расщепления матрицы коэффициентов (РМК) и расщепления векторов газодинамических потоков (РВП)

Схема РМК для линейных одномерных систем, ее эквивалентность простейшей схеме с аппроксимацией "против потока" для скалярных уравнений переноса. Явные и неявные

схемы РМК для одномерных и многомерных квазилинейных систем. Недостатки схем РМК при решении уравнений гидрогазодинамики, принцип построения схем РВП. Явный и неявные методы РВП Уорминга-Стегера для решения нестационарных уравнений Эйлера. Недостаток метода РВП Уорминга-Стегера (недифференцируемость расщепленных векторов потоков в точках смены знаков собственных чисел), его проявления, другие варианты метода РВП, свободные от этого недостатка. Метод Ван-Лири.

Тема 2.2. Структура современных неявных алгоритмов реализации противопоточных методов решения уравнений гидрогазодинамики

Стандартные схемы приближенной факторизации (расщепления по пространственным направлениям - ADI). Схемы приближенной факторизации с диагональным преобладанием (DDADI). LU-разложение (попеременно-треугольный метод). Релаксация Гаусса-Зейделя по сеточным линиям и по плоскостям (LGSR и PGSR). Достоинства и недостатки различных неявных алгоритмов, выбор рациональных алгоритмов при расчете течений различных типов. Оптические методы исследования

Раздел 3. Метод конечных объемов для гидродинамических расчетов в областях сложной геометрии

Тема 3.1. Метод конечных объемов (КО) для расчета стационарных течений несжимаемой жидкости

Интегральная форма записи законов сохранения массы и количества движения. Тензор вязких напряжений. Расчет конвективных и вязких потоков количества движения через грани КО. Задача расчета поля давления, роль уравнения сохранения массы. Методы сведения балансовых соотношений. Варианты алгоритма типа SIMPLE. Вывод уравнения для поправки давления. Возникновение пилообразных осцилляций давления на совмещенных сетках и способы их подавления. Способы улучшения сходимости алгоритмов типа SIMPLE. Метод искусственной сжимаемости. Явные методы решения задачи на установление. Приемы ускорения сходимости. Общие вопросы построения неявных схем.

Тема 3.2. Метод конечных объемов для расчета нестационарных течений несжимаемой жидкости.

Внешние и внутренние причины нестационарности, примеры задач. Расчет нестационарных течений на основе SIMPLE-подобных алгоритмов с применением метода искусственной сжимаемости. Двухслойные и трехслойные схемы. Рекомендации по выбору шага по времени. Мониторинг решения.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Технология процесса обучения по дисциплине «Численные методы в механике жид-

кости, газа и плазмы» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа студентов;
- в) контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончанию;
- г) зачет по окончании изучения дисциплины.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения (ноутбук, проектор) и технологии проблемного обучения.

Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют четко структурировать материал занятия.

Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что позволяет улучшить восприятие материала.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Численные методы в механике жидкости, газа и плазмы» и формирует необходимые компетенции;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность аспирантов.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

6.1. Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляемая на протяжении семестра. Текущий контроль знаний аспирантов организован как выступление на семинарах.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений.

6.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация завершает изучение дисциплины «Численные методы в механике жидкости, газа и плазмы». Форма аттестации – зачет в письменной или устной форме.

На зачете аспирант должен продемонстрировать высокий научный уровень и научные знания по дисциплине «Численные методы в механике жидкости, газа и плазмы».

Контрольные вопросы:

1. Общая характеристика существующих методов численного решения уравнений Эйлера.
2. Схемы Лакса-Вендроффа и Мак-Кормака.
3. Метод характеристик для одномерных нестационарных задач газовой динамики. Выделение разрывов.
4. Сеточно-характеристические методы.
5. Метод С.К. Годунова. Модификация В.М. Колгана для повышения порядка аппроксимации. Кусочно-линейное и кусочно-параболическое представление поведения функции.
6. Стационарный аналог метода С.К. Годунова.
7. Энтропийные условия и условия монотонности. TVD-схемы второго порядка точности.
8. Маршевый метод А.В. Родионова.
9. Необходимость применения неявных методов при расчете пристенных течений. Неявная факторизованная схема (метод Бима - Уорминга).
10. Неявные методы постоянного направления.
11. Явно-неявный метод Мак Кормака.
12. Особенности реализации методов при использовании произвольных криволинейных систем координат. Достоинства и недостатки рассмотренных методов.
13. Понятие корректности начально-краевой задачи.
14. Характеристики, характеристическая форма записи гиперболических систем, условия совместности на характеристиках.
15. Способы задания граничных условий и аппроксимаций на входных и выходных границах при расчете течений различных типов. Построение "неотражающих" граничных условий.
16. Методы расщепления матрицы коэффициентов (РМК) и расщепления векторов газодинамических потоков (РВП).

17. Схема РМК для линейных одномерных систем, ее эквивалентность простейшей схеме с аппроксимацией "против потока" для скалярных уравнений переноса. Недостатки схем РМК при решении уравнений гидрогазодинамики,

18. Явный и неявные методы РВП Уорминга - Стегера для решения нестационарных уравнений Эйлера. Недостаток метода РВП Уорминга - Стегера

19. Стандартные схемы приближенной факторизации

20. Достоинства и недостатки различных неявных алгоритмов, выбор рациональных алгоритмов при расчете течений различных типов

21. Интегральная форма записи законов сохранения массы и количества движения. Тензор вязких напряжений. Расчет конвективных и вязких потоков количества движения через грани КО.

22. Задача расчета поля давления, роль уравнения сохранения массы. Методы сведения балансовых соотношений. Варианты алгоритма типа SIMPLE.

23. Способы улучшения сходимости алгоритмов типа SIMPLE. Метод искусственной сжимаемости. Явные методы решения задачи на установление. Приемы ускорения сходимости. Общие вопросы построения неявных схем.

24. Расчет нестационарных течений на основе SIMPLE-подобных алгоритмов с применением метода искусственной сжимаемости. Двухслойные и трехслойные схемы. Рекомендации по выбору шага по времени. Мониторинг решения.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1. Основная литература

1. Численные методы математической физики. Учеб. пособие. / А.А. Самарский, А.В. Гулин - М. Научный мир, 2003.

2. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов - М. ФИЗМАТЛИТ, 2010.

7.2. Дополнительная литература

1. Численные методы решения уравнений гидрогазодинамики. Учеб. пособие. / - СПб. Изд-во СПбГТУ, 1997.

2. Численное моделирование течений вязкого газа в ударно. / - М. Наука. Физматлит, 1996.

3. Вычислительные методы в динамике жидкостей. В 2 т.: Пер.с англ. / К. Флетчер - Москва Мир, 1991.

7.3. Интернет-ресурсы:

Отечественные журналы:

1. Известия РАН. Механика жидкости и газа (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7827;
2. Физика горения и взрыва (<http://sibran.ru/journals/FGV/>;
<http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1014985>;

Переводные журналы:

1. Combustion, Explosion and Shock Waves (<http://link.springer.com/journal/10573> ;
2. Fluid Dynamics (<http://link.springer.com/journal/10697>;

Иностранные журналы:

1. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science
(<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/chaos>;
2. European Journal of Mechanics - B/Fluids
(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09977546> ;
3. Experimental Thermal and Fluid Science
(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/08941777>;
4. Experiments in Fluids (<http://link.springer.com/journal/348>;
5. Fluid Dynamics Research (<http://iopscience.iop.org/1873-7005/>;
6. Flow, Turbulence and Combustion (<http://link.springer.com/journal/10494>;
7. Journal of Fluids and Structures (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/08899746> ;
8. Journal of Mathematical Fluid Mechanics (<http://link.springer.com/journal/21>;
9. The Journal of Supercritical Fluids
(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/08968446>;
10. Journal of Vibration and Control (<http://jvc.sagepub.com/>;
11. Physica D: Nonlinear Phenomena
(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01672789>);
12. Physics of Fluids (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof1>);
13. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof1>);
14. Physics of Fluids (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2>;
15. Shock Waves (<http://link.springer.com/journal/1934>);
16. Theoretical and Computational Fluid Dynamics (<http://link.springer.com/journal/162>;
17. Wave Motion (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01652125>

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Лекционная аудитория

2. Мультимедийный проектор
3. Персональный компьютер
4. Компьютерный класс

Программу разработал:

канд. физ.-мат. наук, Булович С.В., СПбПУ Петра Великого