

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

по науке – Председатель научно-методического совета по аспирантуре

ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,

д.т.н., с.н.с.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_А.И. Ланшин

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ЭКЗАМЕНА В АСПИРАНТУРУ**

**специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы»**

**Рассмотрена и одобрена на заседании**

**научно-методического совета по аспирантуре**

**Протокол № 19 от 14 сентября 2022 г.**

Москва, 2022

**1. Газовая динамика**

Уравнения течения идеального газа в форме интегральных законов сохранения. Дифференциальная форма уравнений течения. Сильные разрывы и их классификация. Ударная адиабата и теорема Цемплена. Одномерные нестационарные течения с плоскими, цилиндрическими и сферическими волнами. Интегралы энтропии и поперечной скорости (момента поперечной скорости в осесимметричном случае). Уравнения характеристик и условия совместности. Метод характеристик и решение им типичных задач. Изэнтропические течения с плоскими волнами и их инварианты. Простые волны. Задача о выдвижении поршня с конечным и бесконечным ускорением. Максимальная скорость при нестационарном истечении. Условия возникновения скачка. Автомодельная задача о поршне. Рапад произвольного разрыва. Сильный точечный взрыв. Эволюционные и неэволюционные разрывы. Стационарные течения. Интегралы энтропии и полной энтальпии. Плотность тока. Элементарная теория течения в соплах и диффузорах. Плоские и осесимметричные стационарные течения, их интегралы, функция тока и характеристики. Решение задачи о профилировании сопла Лаваля методом характеристик. Плоское потенциальное течение и его инварианты. Плоскость годографа. Течение Прандтля-Майера. Предельный угол разворота сверхзвукового потока. Ударная поляра. Скачки слабого и сильного семейства. Обтекание клина и кругового конуса. Взаимодействие поверхностей разрыва. Регулярное и нерегулярное (Маховское) отражение. Нерасчетное истечение сверхзвуковой струи из сопла. Законы подобия для дозвуковых, сверхзвуковых и околозвуковых течений.

**2. Физическая газовая динамика**

*Динамика релаксирующего газа.* Возбуждение степеней свободы, диссоциация, ионизация. Химические реакции. Времена релаксации. Равновесные и неравновесные течения. Общая система уравнений. Предельные случаи равновесных и замороженных течений. Модель идеально диссоциирющего двухатомного газа Лайтхилла-Фримена. Распространение слабых возмущений в релаксирующем газе. Дисперсия и затухание возмущений. “Замороженная” скорость звука. Ударные волны в релаксирующем газе. Уравнение характеристик. Течение релаксирующего газа в соплах, изменение параметров по длине сопла.

*Двухфазные течения*. Общая система уравнений. Предельные случаи сильного и слабого взаимодействия фаз. Поверхности разрывы в двухфазных течениях. Распространение слабых возмущений. Примеры течений двухфазных течений в соплах. Течения с твердыми частицами.

**3. Уравнения вязкой жидкости и теория пограничного слоя**

Интегральные законы сохранения импульса и массы. Связь между тензором вязких напряжений и тензором скоростей деформации, возможные законы реологии, закон Ньютона. Уравнения Навье – Стокса. Предельный случай больших чисел Рейнольдса. Точные решения уравнений Навье-Стокса для течения между двух плоских стенок, между вращающимися цилиндрами. Уравнения пограничного слоя, автомодельное решение Блазиуса и Фолкнера – Скэн. Интегральное уравнение Кармана. Коэффициент трения на стенке, зависимость от числа Рейнольдса. Приближенные методы решения. Нестационарный пограничный слой. Теория отрывных течений. Вязко-невязкое взаимодействие, использование интеграла Коши. Переход от ламинарного к турбулентному режиму течения. Особенности турбулентного пограничного слоя.

**4. Теория турбулентности**

Осреднение, спектральные, корреляционные функции, распределение вероятностей, характерные масштабы. Турбулентная диффузия Тэйлора. Корреляционные тензоры в изотропном векторном поле. Уравнение Кармана - Хоуарта, инвариант Лойцянского, вырождение турбулентности при малых числах Рейнольдса. Скорость диссипации, каскадный перенос энергии по спектру, гипотезы Колмогорова, вырождение турбулентности при больших числах Рейнольдса. Спектр и корреляция в инерционном интервале. Полуэмпирические модели турбулентного переноса, турбулентная вязкость, теория “пути смешения” Прандтля. Уравнения для переноса тензора напряжений трения Рейнольдса. Структура плоского однородного потока со сдвигом.

**5. Теплообмен**

Закон Фурье, коэффициент теплопередачи, уравнение теплопроводности. Уравнение энергии. Уравнение переноса тепла, число Прандтля, критерий Нуссельта. Роль вязкой диссипации при вариации числа Рейнольдса. Распределение температуры в течениях Пуазейля и Куэтта. Температурный пограничный слой, аналогия Рейнольдса, задача о термометре и об охлаждении стенки. Свободная конвекция возле вертикальной стенки, числа Рэлея и Грасгофа . Число Нуссельта при обтекании цилиндра. Перенос тепла в турбулентном пограничном слое. Заградительное охлаждение поверхностей. Лучистый теплообмен.

**6. Химическая кинетика и теория горения**

Расчет температуры горения и состава продуктов сгорания. Основы химической кинетики. Классификация химических реакций. Закон действующих масс. Константы скоростей реакций. Энергия активации, порядок реакции. Скорость неизотермической адиабатической реакции. Распространение пламени в однородной топливо-воздушной смеси. Теория нормального распространения пламени, методы определения скорости нормального горения. Концентрационные пределы распространения пламени. Распространение пламени в турбулентном потоке. Горение в сверхзвуковом потоке. Детонационное горение, детонация Чепмена-Жуге. Косой скачок уплотнения с подводом тепла. Диффузионное горение газов. Структура факела горения, фронтальная модель горения.

**7. Численные методы и математическое моделирование**

Интегральные законы сохранения для течений вязкого теплопроводного газа. Дивергентная форма уравнений Навье-Стокса. Различные формы записи уравнения энергии. Граничные условия на стенке. Система уравнений Рейнольдса. Область применения уравнений Эйлера, Навье-Стокса и Рейнольдса для течений сжимаемого вязкого газа. Конечно-разностные схемы для линейного модельного уравнения переноса. Исследование устойчивости разностных схем. Условия устойчивости Неймана, Куранта-Фридрихса-Леви. Монотонность разностных схем. Основные схемы Лакса, Лакса-Вендрофа, Мак-Кормака. Критерий монотонности и однородности. Диссипация и дисперсия разностных схем. Построение монотонной схемы повышенного порядка аппроксимации. Принцип минимальных производных. Исследование устойчивости и монотонности неоднородной схемы. Понятие об обобщенном решении на примере квазилинейного уравнения переноса.

**8. Экспериментальные методы**

Особенности измерений в аэродинамике. Приборы для измерения полного и статического давления, насадки для измерения направления скорости. Метод Теплера, теневой метод визуализации потоков. Голографическая интерферометрия. Термопары, влияние излучения на точность измерения. Оптические и спектральные методы измерения температуры. Термокраски. Лазерный доплеровский измеритель скорости. Измерение конценрации пассивной примеси. Метод КАРС, метод лазерной индуцированной флюоресценции. Аналоговые и цифровые методы обработки случайных процессов. Аналоговые и цифровые приборы для измерения спектров, корреляций и распределения вероятностей. Ошибка измерения среднего значения и дисперсии случайного сигнала из-за конечности времени осреднения. Частота дискретизации и шаг квантования при аналого-цифровом преобразовании. Термоанемометр, измерение турбулентности.

**Основная литература**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика Изд. 5-е. М.: Дрофа, 2006.
2. Куликовский А.Г., Любимов Г.А. Магнитная гидродинамика. Изд. 3-е. М.: Логос, 2011.
3. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Институт компьютерных исследований, 2006.
4. Крайко А.Н., Ватажин А.Б., Секундов А.Н. Газовая динамика. Избранное. В 2-х т. Т. 1. М.: Физ.мат.лит., 2005.
5. Крайко А.Н., Ватажин А.Б., Секундов А.Н. Газовая динамика. Избранное. В 2-х т. Т. 2. М.: Физ.мат.лит., 2005.
6. Крайко А.Н. Краткий курс теоретической газовой динамики. М.: изд-во МФТИ, 2007.
7. Крайко А.Н., Пудовиков Д.Е., Якунина Г.Е. Теория аэродинамических форм, близких к оптимальным. - М.: Янус-К, 2001.
8. Крайко А.Н. Теоретическая газовая динамика. Классика и современность. - М.: Торус Пресс, 2010.
9. Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и новые принципы организации горения / Под ред. А.М. Старика. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011.
10. Скибин В.А., Солонин В.И., Темис Ю.М. и др. Авиационные двигатели. /Энциклопедия. М.: Машиностроение, 2010.

**Дополнительная литература**

1. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988 г.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986 г.
3. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991г.
4. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Наука, 1977 г.
5. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1977 г.
6. Хинце И.О. Турбулентность. Физматгиз, M.,"Наука", 1963.
7. Зельдович Я.Б. и др. Математическая теория горения. М.: Наука, 1975г.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974 г.
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1980 г.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

Начальник сектора 8000-03 «Аспирантура» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Е.В. Джамай