

# Газовая динамика

Годовой спецкурс по выбору кафедры  
(2015–2016 учебный год, Леонтьев Н. Е.)

## Введение

1. Предмет газовой динамики, области приложений.
2. Законы сохранения в интегральной и дифференциальной форме. Условия на поверхности разрыва, вытекающие из законов сохранения.
3. Модель идеального (невязкого) совершенного нетеплопроводного газа: замкнутая система уравнений, типичные граничные условия. Область применимости модели (оценки возможности пренебрежения вязкостью, теплопроводностью и тяжестью).

## Одномерные стационарные и нестационарные течения газа

4. Интеграл адиабатичности. Интеграл Бернулли. Параметры торможения, критические параметры. Выражение параметров потока через число Маха или коэффициент скорости. Максимальная скорость стационарного течения. Переход к модели несжимаемой жидкости при малых скоростях потока.
5. Поверхности разрыва в газовой динамике. Контактный (тангенциальный) разрыв, ударная волна. Соотношения на прямом скачке (условия Рэнкина — Гюгонио). Сохранение константы в интеграле Бернулли при переходе через прямой скачок. Выражение параметров за ударной волной через число Маха. Предельные случаи сильных и слабых ударных волн.
6. Связь между термодинамическими параметрами по обе стороны от ударной волны (адиабата Гюгонио). Сравнение с адиабатой Пуассона. Прямая (луч) Рэлея — Михельсона. Скачки уплотнения и скачки разрежения. Теорема Цемплена. Порядок роста энтропии на ударной волне для совершенного газа. Качественное представление об описании поверхностей разрыва с энергывыделением (детонационные волны, волны медленного горения, скачки конденсации).
7. Одномерное течение вязкого совершенного газа. Качественное представление о структуре ударной волны. Оценка толщины ударной волны в рамках континуальной модели.
8. Распространение малых возмущений в газе (теория звука). Конус Маха. Угол Маха. Качественное представление об эффекте Доплера.
9. Течение в канале переменного поперечного сечения в квазиодномерном (гидравлическом) приближении. Простое сопло. Формула Сен-Венана — Ванцеля. Сопло Лавала. Однозначная зависимость площади поперечного сечения сопла от числа Маха («формула сопла Лавала»). Расчетный режим, нерасчетные режимы.
10. Понятие гиперболичности для системы квазилинейных уравнений с частными производными с двумя независимыми переменными. Связь с определением гиперболичности для дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Характеристики. Теория слабых разрывов.
11. Приведение к характеристическому виду системы уравнений для одномерных (с плоскими волнами) нестационарных течений газа.
12. Инварианты Римана для течений с постоянной энтропией. Простая волна (волна Римана). Теорема о примыкании простой волны к области с постоянными параметрами. Опрокидывание волны сжатия (градиентная катастрофа).
13. Взаимодействие характеристик с разрывами. Понятие об эволюционности поверхности разрыва. Скорости газа относительно ударной волны до и перед ней.
14. Задача о поршне, выдвигающемся из трубы с постоянной скоростью. Центрированная волна разрежения (центрированная волна Римана). Максимальная скорость нестационарного истечения газа в вакуум.
15. Задача о поршне, вдвигающемся в трубу с постоянной скоростью.
16. Постановка задачи о распаде произвольного разрыва. Представление о способе нахождения решения с помощью  $(u; p)$ -диаграмм. Работа ударной трубы. Предельные случаи взаимодействия слабых волн. Представление о газогидравлической аналогии (анalogии мелкой воды) и гидравлическом прыжке на мелкой воде.
17. Качественное представление о решении задач об отражении ударной волны от стенки, прохождении ударной волны через контактный разрыв, столкновении ударных волн.
18. Задача о сильном взрыве. Автомодельное решение фон Неймана — Седова. Качественное представление о поведении решения. Качественное представление о поздних (неавтомодельных) стадиях сильного взрыва.
19. Уравнения одномерных течений газа в лагранжевых переменных. Соотношения на поверхности сильных разрывов при использовании лагранжевых переменных.
20. Линеаризация одномерных уравнений газовой динамики с плоскими волнами при переходе к плоскости инвариантов Римана.
21. Использование интегральных законов сохранения и приближенных методов. Пример: зависание вертолета, заполнение вакуумированного сосуда.

## Двумерные стационарные течения газа

22. Функция тока. Потенциал скорости. Уравнение для потенциала для плоских стационарных течений газа. Теорема Фридмана — Крökко о вихрях. Нарушение потенциальности за искривленной ударной волной.
23. Гиперболичность уравнений плоских стационарных сверхзвуковых течений газа. Характеристики. Угол наклона характеристик к скорости потока (угол Маха).

24. Преобразование Лежандра. Линеаризация уравнений газовой динамики при переходе к плоскости годографа. Уравнение Эйлера — Трикоми для околосзвуковых течений.
25. Обтекание тупого угла. Простая волна разрежения (волна Прандтля — Майера).
26. Обтекание бесконечного клина. Косая ударная волна. Ударная поляра. Предельный угол поворота потока. Обтекание пластины под углом атаки.
27. Отражение ударной волны от плоской стенки. Регулярное и нерегулярное (маховское) отражение.

### **Внешние задачи аэродинамики**

28. Линеаризация уравнений газовой динамики в случае дозвуковых и сверхзвуковых течений. Качественная картина обтекания крыла в различных режимах.
29. Тонкий профиль в дозвуковом потоке. Закон Прандтля — Глауэрта. Критическое число Маха. Качественное объяснение использования стреловидных крыльев при больших дозвуковых скоростях.
30. Тонкий профиль в сверхзвуковом потоке. Закон Аккерета. Отсутствие парадокса Д'Аламбера — Эйлера, волновое сопротивление.
31. Качественная картина сверхзвукового обтекания заостренных и затупленных тел. Потери давления торможения (полного давления) при переходе через прямой скачок. Формула Рэлея.
32. Принцип независимости от числа Маха для гиперзвуковых течений. Формула Ньютона, интерпретация картины обтекания в модели Ньютона как предела при стремлении показателя адиабаты к единице. Определение сопротивления сферы с использованием формулы Ньютона. Качественное представление о формуле Буземана.
33. Представление о численных методах решения задач газовой динамики. Принципы построения конечно-разностных схем. Метод характеристик, сложности его реализации. Представление о методе С.К.Годунова (методе распада разрывов). Метод конечных объемов. Консервативность разностной схемы. Задание граничных условий. Различные способы расчета разрывных решений. Методы выделения скачков и сквозной счет. Метод искусственной вязкости. Метод установления для решения стационарных задач.

## **Литература**

### *Основные источники*

1. С т у л о в В. П. Лекции по газовой динамике. М., Физматлит, 2004  
(<http://gidropraktikum.narod.ru/Stulov.djvu>)
2. Ч ё р н ы й Г. Г. Газовая динамика. М., Наука, 1988  
(<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Cherny1988ru.djvu>)
3. О в с я н н и к о в Л. В. Лекции по основам газовой динамики. М.-Ижевск, РХД, 2003  
(<http://gidropraktikum.narod.ru/Ovsyannikov.djvu>)
4. С е д о в Л. И. Механика сплошной среды. Т. 2. М., Наука, 1970  
([http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Sedov\\_MSS\\_t2\\_1970ru.djvu](http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Sedov_MSS_t2_1970ru.djvu))
5. Л а н д а у Л. Д., Л и ф ш и ц Е. М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М., Наука, 1986  
(<http://gidropraktikum.narod.ru/Landau-hydro.djvu>)

### *Дополнительные источники*

6. К о ч и н Н. Е., К и б е л ь И. А., Р о з е Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. М., Физматлит, 1963  
([http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/KochinKibelRoze\\_ch2\\_1963ru.djvu](http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/KochinKibelRoze_ch2_1963ru.djvu))
7. Л о й ц я н с к и й Л. Г. Механика жидкости и газа. М., Дрофа, 2003  
(<http://gidropraktikum.narod.ru/Loitsyanskii-2003.djvu>)
8. Л и п м а н Г. В., Р о ш к о А. Элементы газовой динамики. М., ИЛ, 1960  
(<http://gidropraktikum.narod.ru/Liepmann-Roshko.djvu>)
9. С а м а р с к и й А. А., П о п о в Ю. П. Разностные методы решения задач газовой динамики. М., Наука, 1992  
(<http://gidropraktikum.narod.ru/Samarskii-Popov.djvu>)
10. Альбом течений жидкости и газа. Сост. М.Ван-Дайк. Пер. с англ. М., Мир, 1986  
([http://vk.com/wall-102183983\\_69](http://vk.com/wall-102183983_69))
11. Учебный фильм «Общие основы аэродинамики»  
([http://vk.com/wall-102183983\\_51](http://vk.com/wall-102183983_51))
12. Учебный фильм «Effects of fluid compressibility»  
([http://vk.com/wall-102183983\\_28](http://vk.com/wall-102183983_28))
13. Учебный фильм «Channel flow of a compressible fluid»  
([http://vk.com/wall-102183983\\_9](http://vk.com/wall-102183983_9))
14. Учебный фильм «High speed flight»  
([http://vk.com/wall-102183983\\_68](http://vk.com/wall-102183983_68))

При подготовке к ответу на экзамене можно пользоваться конспектом лекций и учебными пособиями, однако на вопросы, касающиеся общей структуры разделов курса (физическая и математическая постановка задач, связь с другими математическими моделями, общие схемы построения решений и т.п.), студент должен отвечать без обращения к дополнительным источникам информации.