

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИТ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ



Директор
академик РАН

Д.М.Маркович

«21» апреля 2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА МОДУЛЯ

Механика жидкости и газа

научная специальность: 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы

Год обучения: 2, семестр 3, 4

№	Вид деятельности	Sеместр
		3,4
1	Лекции, час.	160
2	Занятий в контактной форме час, из них	192
6	контактные часы на аттестацию, час.	20
8	консультаций, час.	12
9	Самостоятельная работа, час.	240
10	в том числе на выполнение письменных работ, час	
11	Форма аттестации	зачет
12	Всего академических часов	432 (123Е)

Новосибирск 2022

Рабочая программа модуля «Механика жидкости и газа» разработана в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы», утвержденными Минобрнауки России № 951 от 20.10.2021.

Рабочая программа утверждена решением ученого совета ИТ СО РАН,
протокол №

Программу разработал:

Д.Ф.-м.н., профессор

Н.И. Яворский

Согласовано:

Зам. директора по научной работе
к.ф.-м.н.

Д.Ф. Сиковский

Аннотация

к рабочей программе модуля «Механика жидкости и газа»

Рабочая программа модуля «Механика жидкости и газа» составлена в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы, утвержденными Минобрнауки России № 951 от 20.10.2021. В состав модуля включены: рабочие программы дисциплин «Гидродинамическая устойчивость и турбулентность», «Динамика вязких жидкостей и газа», рабочая программа научной практики, план научной деятельности, рабочие программы вариативных дисциплин».

Рабочая программа модуля «Механика жидкости и газа» имеет своей целью дать аспирантам углубленные знания и методы решения задач, возникающих при изучении динамики сплошной среды. Выделены проблемы, имеющие первостепенное значение в работах, связанных с изучением течения как идеального, так и реальных газов. Особое внимание уделено описанию течения газа с доминирующим влиянием диссипативных эффектов, вызванных наличием у газа внутреннего трения – вязкости. Выделены отдельные проблемы, иллюстрирующие влияние вязкости среды наиболее наглядно и дающие представление об основных методах решения задач, важных для практического использования. Программа модуля направлена на подготовку аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по научной дисциплине 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» по физико-математическим и техническим наукам.

Модуль «Механика жидкости и газа» реализуется в 3-4 семестрах (2 курс аспирантуры) и является базовым для выполнения научно-исследовательской деятельности, направленной на подготовку докторской диссертации к защите.

1. Краткое содержание разделов дисциплин, входящих в модуль «Механика жидкости и газа»:

1.1. Вводные положения

Понятие сплошной среды. Микроскопические, статистические и макроскопические феноменологические методы описания свойств, взаимодействий и движений материальных сред. Области приложения механики жидкости, газа и плазмы. Механические модели, теоретическая схематизация и постановка задач, экспериментальные методы исследований. Основные исторические этапы в развитии механики жидкости и газа.

1.2. Кинематика сплошных сред

Системы отсчета и системы координат. Лагранжевы и эйлеровы координаты. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета в ньютоновской механике. Точки зрения Эйлера и Лагранжа при изучении движения сплошных сред. Определения и свойства кинематических характеристик движения: перемещения, траектории, скорость, линии тока, критические точки, ускорение, тензор скоростей деформации и его инварианты, вектор вихря, потенциал скорости,

циркуляция скорости, установившееся и неустановившееся движение среды. Кинематические свойства вихрей.

1.3. Основные понятия и уравнения динамики и термодинамики

Закон сохранения массы. Уравнение неразрывности в переменных Эйлера и Лагранжа. Условие несжимаемости. Многокомпонентные смеси. Потоки диффузии. Уравнения неразрывности в форме Эйлера для многокомпонентных смесей. Массовые и поверхностные, внутренние и внешние силы. Законы сохранения количества движения и моментов количества движения для конечных масс сплошной среды. Дифференциальные уравнения движения и момента количества движения сплошной среды. Работа внутренних поверхностных сил.

Кинетическая энергия и уравнение живых сил для сплошной среды в интегральной и дифференциальной формах. Понятие о параметрах состояния, пространстве состояний, процессах и циклах. Закон сохранения энергии, внутренняя энергия. Уравнение притока тепла. Вектор потока тепла. Дифференциальные уравнения энергии и притока тепла. Законы теплопроводности Фурье. Различные частные процессы: адиабатический, изотермический и др. Обратимые и необратимые процессы. Совершенный газ. Цикл Карно. Второй закон термодинамики. Энтропия и абсолютная температура. Некомпенсированное тепло и производство энтропии. Неравенство диссипации, тождество Гиббса. Диссипативная функция. Основные макроскопические механизмы диссипации. Понятие о принципе Онзагера. Уравнения состояния. Термодинамические потенциалы двухпараметрических сред.

1.4. Модели жидкого и газообразных сред

Модель идеальной жидкости. Уравнения Эйлера. Полные системы уравнений для идеальной, несжимаемой и сжимаемой жидкостей. Начальные и граничные условия. Интегралы Бернулли и Коши–Лагранжа. Явление кавитации. Теорема Томсона и динамические теоремы о вихрях. Возникновение вихрей. Теорема Бьеркнеса. Модель вязкой жидкости. Линейно-вязкая (ニュートンовская) жидкость. Уравнения Навье–Стокса. Полные системы уравнений для вязкой несжимаемой и сжимаемой жидкостей. Начальные и граничные условия. Диссипация энергии в вязкой теплопроводной жидкости. Применение интегральных соотношений к конечным объемам среды при установившемся движении. Теория реактивной тяги и теория идеального пропеллера.

1.5. Поверхности разрыва в течениях жидкости, газа и плазмы

Поверхности слабых и сильных разрывов. Разрывы сплошности. Условия на поверхностях сильного разрыва в материальных средах и в электромагнитном поле. Тангенциальные разрывы и ударные волны.

1.6. Гидростатика

Равновесие жидкости и газа в поле потенциальных массовых сил. Закон Архимеда. Равновесие и устойчивость плавающих тел и атмосферы.

1.7. Движение идеальной несжимаемой жидкости

Общая теория непрерывных потенциальных движений несжимаемой жидкости. Свойства гармонических функций. Многозначность потенциала в многосвязных областях. Кинематическая задача о произвольном движении твердого тела в неограниченном объеме идеальной несжимаемой жидкости. Энергия, количество движения и момент количества движения жидкости при движении в ней твердого тела. Движение сферы в идеальной жидкости. Силы воздействия идеальной жидкости на тело, движущееся в безграничной массе жидкости. Основы теории присоединенных масс. Парадокс Даламбера. Плоские движения идеальной жидкости. Функция тока. Применение методов теории аналитических функций комплексного переменного для решения плоских задач гидродинамики и аэродинамики. Стационарное обтекание жидкостью цилиндра и профиля. Формулы Чаплыгина и теорема Жуковского. Правило Жуковского и Чаплыгина определения циркуляции вокруг крыльев с острой задней кромкой. Нестационарное обтекание профилей. Плоские задачи о струйных течениях жидкости. Обтекание тел с отрывом струй. Схемы Кирхгофа, Эфроса и др.

Определение поля скоростей по заданным вихрям и источникам. Формулы Био-Савара. Прямолинейный и кольцевой вихри. Законы распределения давлений, силы, обусловливающие вынужденное движение прямолинейных вихрей в плоском потоке. Постановка задачи и основные результаты теории крыла конечного размаха. Несущая линия и несущая поверхность. Постановка задачи Коши-Пуассона о волнах на поверхности тяжелой несжимаемой жидкости. Гармонические волны. Фазовая и групповая скорость. Дисперсия волн. Перенос энергии прогрессивными волнами. Теория мелкой воды. Уравнения Буссинеска и Кортевега-де-Вриза. Нелинейные волны. Солитон.

1.8. Движение вязкой жидкости.

Теория пограничного слоя. Тurbулентность
Ламинарное движение несжимаемой вязкой жидкости. Течения Куэтта и Пуазейля. Течение вязкой жидкости в диффузоре. Диффузия вихря. Приближения Стокса и Озенна. Задача о движении сферы в вязкой жидкости в постановке Стокса.

Ламинарный пограничный слой. Задача Блазиуса. Интегральные соотношения и основанные на их использовании приближенные методы в теории ламинарного пограничного слоя. Явление отрыва пограничного слоя. Устойчивость пограничного слоя. Теплообмен с потоком на основе теории пограничного слоя.

Тurbулентность. Опыт Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса. Turbulentный перенос тепла и вещества. Полуэмпирические теории turbулентности. Профиль скорости в пограничном слое. Логарифмический закон. Прямое численное решение уравнений гидромеханики при наличии turbулентности.

Свободная и вынужденная конвекция. Приближение Буссинеска. Линейная неустойчивость подогреваемого плоского слоя и порог возникновения конвекции. Понятие о странном аттракторе. Движение жидкости и газа в пористой среде. Закон Дарси. Система дифференциальных уравнений подземной гидрогазодинамики. Неустановившаяся фильтрация газа. Примеры точных автомодельных решений.

1.9. Движение сжимаемой жидкости. Газовая динамика

Распространение малых возмущений в сжимаемой жидкости. Волновое уравнение. Скорость звука.

Запаздывающие потенциалы. Эффект Доплера. Конус Маха. Уравнения газовой динамики. Характеристики.

Влияние сжимаемости на форму трубок тока при установившемся движении. Элементарная теория сопла Лаваля. Одномерные неустановившиеся движения газов с плоскими, цилиндрическими и сферическими волнами. Автомодельные движения и классы соответствующих задач. Задачи о поршне и о сильном взрыве в газе.

Волны Римана. Эффект опрокидывания волн. Адиабата Гюгонио. Теорема Цемплена. Эволюционные и неэволюционные разрывы. Теория волн детонации и горения. Правило Жуге и его обоснование. Задача о структуре сильного разрыва. Качественное описание решения задачи о распаде произвольного разрыва. Плоские стационарные сверхзвуковые течения газа. Метод характеристик. Течение Прандтля Майера. Косой скачок уплотнения. Обтекание сверхзвуковым потоком клина и конуса. Понятие об обтекании тел газом с отошедшей ударной волной. Линейная теория обтекания тонких профилей и тел вращения. Течения с гиперзвуковыми скоростями. Закон сопротивления Ньютона.

1.10. Электромагнитные явления в жидкостях

Электромагнитное поле. Уравнения Максвелла в пустоте. Взаимодействие электромагнитного поля с проводниками. Сила Лоренца. Закон сохранения полного заряда. Закон Ома. Среды с идеальной проводимостью. Вектор и уравнение Умова-Пойнтинга. Джоулево тепло. Уравнения импульса и притока тепла для проводящей среды.

Уравнения магнитной гидродинамики. Условия вмороженности магнитного поля в среду. Понятие о поляризации и намагничивании жидкостей.

1.11. Физическое подобие, моделирование

Система определяющих параметров для выделенного класса явлений. Основные и производные единицы измерения. Формула размерностей. П-теорема. Примеры приложений. Определение физического подобия. Моделирование. Критерии подобия. Числа Эйлера, Маха, Фруда, Рейнольдса, Струхalia, Прандтля.

2. Научная практика

Целью освоения научной практики является подготовка аспирантов к профессиональной научной деятельности. Научная практика проводится с целью систематизации, расширения и закрепление профессиональных знаний, формирование у аспирантов навыков ведения самостоятельной научной работы,

3. Научная деятельность, направленная на подготовку к защите диссертации

. Организация научной деятельности аспиранта

Научная деятельность – форма практической работы аспиранта, позволяющая ему изучить научно-техническую информацию по теме кандидатской диссертации, выполнить проектные разработки по теме, провести расчеты по разработанному алгоритму с применением

сертифицированного программного обеспечения, участвовать в экспериментах, составлять описания проводимых исследований, анализ и обобщение результатов, положенных в основу кандидатской диссертации.

4. Вариативные дисциплины

Вариативные дисциплины помогают решить основные задачи, стоящими при изучении данного модуля, а именно, углубленное изучение теоретических вопросов современной механики жидкости и газа, развитие практических навыков решения задач в данной области. Особое внимание удалено описанию течений жидкости и газа с доминирующим влиянием диссипативных эффектов, вызванных наличием вязкости. Даётся представление об основных методах решения задач, важных для практического использования.

5. Текущий и промежуточный контроль

По дисциплинам, входящим в структуру модуля «Механика жидкости и газа», проводится текущий контроль успеваемости, который осуществляется в форме презентации аспирантом доклада по одному из разделов программы дисциплин.

Промежуточная аттестация по дисциплинам проводится в виде дифференцированных зачетов, по всему модулю целиком – кандидатский экзамен.

6. Итоговая аттестация

Итоговая аттестация проводится в форме оценки диссертации на предмет ее соответствия критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Лицам, успешно прошедшим итоговую аттестацию, выдается свидетельство об окончании аспирантуры.

Лицам, не прошедшим итоговой аттестации или получившим неудовлетворительные результаты, выдается справка об обучении (периоде обучения).

При освоении дисциплин аспиранты выполняют следующие виды учебной работы: лекции, консультации, самостоятельная работа.

Самостоятельная работа включает: самостоятельное изучение теоретического материала по разделам дисциплины, подготовку доклада по одному из разделов программы дисциплины, включающего обзор литературы на заданную тематику за последние 5 лет.

Общий объем дисциплины – 432 академических часов

7. Технология обучения

В ходе реализации учебного процесса по рабочей программе модуля «Механика жидкости и газа» проводятся лекционные занятия. Материал лекционного курса увязывается с передовыми исследованиями всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки аспирантов. Специально указываются темы, активно обсуждающиеся в текущей профессиональной научной литературе. По темам, рассматриваемым на лекциях и изучаемым самостоятельно, проводятся консультации.

8. Программное обеспечение

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническое обеспечение

№	Наименование	Назначение
1	Презентационное оборудование (мультимедиа-проектор, экран, компьютер для управления) Ноутбук, мультимедиа-проектор, экран. Программное обеспечение для демонстрации презентаций. Рабочее место с выходом в Интернет. Библиотечный фонд ИТ СО РАН.	Для проведения лекционных занятий
2	Компьютерный класс (с выходом в Internet)	Для организации самостоятельной работы

10. Основные критерии оценивания

5 (отлично):

Ответ полный, без замечаний, хорошо структурированный, продемонстрировано хорошее знание теоретических под ходов к анализу и решению рассматриваемой проблемы, про иллюстрировано примерами, даны аргументированные, полные и логичные ответы на вопросы членов комиссии, проявлено творческое отношение к предмету.

4 (хорошо):

Ответ полный с незначительными замечаниями, недостаточно структурирован, продемонстрировано знание основных теоретических подходов к анализу и решению рассматриваемой проблемы, про иллюстрировано примерами, ответы на вопросы членов комиссии даны с незначительными замечаниями.

3 (удовлетворительно):

В ответе есть упущения, ответ недостаточно структурирован, знание основных теоретических под ходов к анализу и решению рассматриваемой проблемы продемонстрировано с упущенными, есть затруднения при практическом применении теории, есть затруднения при ответе на вопросы комиссии.

2 (неудовлетворительно):

В ответе есть значительные упущения и не точности, многие основные положения теоретических подходов к анализу и решению рассматриваемой проблемы не представлены или в их выводе допущены ошибки, ответ не структурирован, ответы на вопросы комиссии отсутствуют.

11. Литература

Основная литература

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. I, II. М.: Физматгиз,
2. 1963.
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. I, II. 5-е изд. М.: Наука, 1994.
4. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 10-е изд. М.: Наука, 1987.
1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

Дополнительная литература

1. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости. М.: Издательство иностранной литературы, 1963.
2. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. 3-е изд. М.: Наука, 1980.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
4. Механика сплошных сред в задачах. Т. 1, 2 / Г.Я. Галин, А.Н. Голубятников, Я.А.
5. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959.
6. Зельдович Я.Б., Райз器 Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
7. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
8. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
9. Лотов К.В. Физика сплошных сред. М.-Ижевск. Институт компьютерных исследований, 2002.
10. Gallavotti G. Foundations of Fluid Mechanics. Rome: University of Rome, 2000.
11. Currie I.G. Fundamental of Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill, 2003.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — Издание 6-е. — М.: Физматлит, 2015. — 728 с. — (Теоретическая физика, т. VI).
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. 7-е изд., испр. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.
4. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988.
5. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.-Ижевск: РХД, 2004.
6. Куликовский А.Г., Любимов Г.А. Магнитная гидродинамика. М.: Физматгиз, 1962.
7. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. изд-во физ.-тех. лит-ры, 1955.
8. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. РХД, 2000.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

Дополнительная литература

12. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости. М.: Издательство иностранной литературы, 1963.
13. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. 3-е изд. М.: Наука, 1980.
14. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
15. Механика сплошных сред в задачах. Т. 1, 2 / Г.Я. Галин, А.Н. Голубятников, Я.А.

16. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959.
17. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
18. Гершун Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
19. Узем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
20. Лотов К.В. Физика сплошных сред. М.-Ижевск. Институт компьютерных исследований, 2002.
21. Gallovotti G. Foundations of Fluid Mechanics. Rome: University of Rome, 2000.
22. Currie I.G. Fundamental of Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill, 2003.