

УТВЕРЖДЕНА

Приказом № 32

от «02» августа 2023г.

Принята Ученым советом ИГиЛ СО РАН

Протокол № 8 от «30» июня 2023г.

## ПРОГРАММА

кандидатского экзамена по специальной дисциплине

### 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы

(физико-математические науки, технические науки)

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: механика сплошной среды, гидродинамика, газовая динамика, термодинамика, электродинамика.

#### 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 ([5], Введение; [2], гл. I, §§ 1, 2).

Основные исторические этапы в развитии механики жидкости и газа ([5], Введение).

#### 2. Кинематика сплошных сред

Системы отсчета и системы координат. Лагранжевы и эйлеровы координаты ([2], гл. II, §§1, 2). Инерциальные и неинерциальные системы отсчета в ньютоновской механике ([2], гл. II, §§ 1, 2; гл. VI, § 3; [3\*], § 5).

Точки зрения Эйлера и Лагранжа при изучении движения сплошных сред ([1], ч. I, гл. I, §§ 6–8; [2], гл. II, §§ 1–3).

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 ([2], гл. II, §§ 1–3, 6–8; [1], ч. I, гл. I, § 9).

Кинематические свойства вихрей ([2], гл. VI, § 7; [5] § 6).

#### 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 ([2], гл. III, § 1; [4], § 58).

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 ([2], гл. III, § 2, 3).

Работа внутренних поверхностных сил. Кинетическая энергия и уравнение живых сил для сплошной среды в интегральной и дифференциальной формах ([2], гл. V, § 1).

Понятие о параметрах состояния, пространстве состояний, процессах и циклах. Закон сохранения энергии, внутренняя энергия ([2], гл. V, § 2). Уравнение притока тепла ([2], гл. 5, § 2). Вектор потока тепла ([2], гл. V, § 7). Дифференциальные уравнения энергии и притока тепла ([3\*], § 13). Законы теплопроводности Фурье ([2], гл. V, § 7). Различные частные процессы: адиабатический, изотермический и др. ([2], гл. V, § 4).

Обратимые и необратимые процессы ([2], гл. V, § 3). Совершенный газ ([2], гл. V, § 4). Цикл Карно ([2], гл. V, § 4). Второй закон термодинамики ([2], гл. V, § 5; [3\*], §§ 13–15). Энтропия и абсолютная температура ([2], гл. V, § 5). Некомпенсированное тепло и производство энтропии ([2], гл. V, §§ 5, 8). Неравенство диссипации, тождество Гиббса ([3\*], §§ 13–15). Диссипативная функция ([2], гл. V, § 8). Основные макроскопические механизмы диссипации ([2], гл. V, §§ 7, 8). Понятие о принципе Онзагера ([2], гл. V, § 8, 9; [3\*], § 13). Уравнения состояния. Термодинамические потенциалы двухпараметрических сред ([2], гл. V, § 6).

#### 4. Модели жидких и газообразных сред

Модель идеальной жидкости ([2], гл. IV, § 1; гл. V, § 7). Уравнения Эйлера ([2], гл. IV, § 1). Полные системы уравнений для идеальной, несжимаемой и сжимаемой жидкостей. Начальные и граничные условия ([2], гл. IV, § 1, гл. V, § 7; гл. VII, § 1).

Интегралы Бернулли и Коши — Лагранжа ([2], гл. VIII, §§ 2–5). Явление кавитации ([2], гл. VIII, §§ 4, 8; [9], гл. V, § 2).

Теорема Томсона и динамические теоремы о вихрях. Возникновение вихрей. Теорема Бьеркнеса ([1], ч. I, гл. V, §§ 1–9; [2], гл. VI, § 7).

Модель вязкой жидкости. Линейно-вязкая (ньютоновская) жидкость. Уравнения Навье — Стокса ([2], гл. IV, § 2; [4], § 15). Полные системы уравнений для вязкой несжимаемой и сжимаемой жидкостей. Начальные и граничные условия ([2], гл. V, § 7; гл. VII, § 1). Диссипация энергии в вязкой теплопроводной жидкости ([2], гл. V, § 7; [4], § 16).

Применение интегральных соотношений к конечным объемам среды при установившемся движении ([2], гл. VIII, § 7). Теория реактивной тяги и теория идеального пропеллера ([2], гл. VIII, § 10).

#### 5. Поверхности разрыва в течениях жидкости, газа и плазмы

Поверхности слабых и сильных разрывов ([1], ч. II, гл. I, § 4). Разрывы сплошности ([3\*], §§ 18, 19).

Условия на поверхностях сильного разрыва в материальных средах и в электромагнитном поле ([2], гл. VII, §§ 4, 5; [3\*], § 35). Тангенциальные разрывы и ударные волны ([3\*], § 18, 19).

#### 6. Гидростатика

Равновесие жидкости и газа в поле потенциальных массовых сил. Закон Архимеда. Равновесие и устойчивость плавающих тел и атмосферы ([2], VIII § 1; [1], ч. I, гл. III, §§ 1–4, 8).

## 7. Движение идеальной несжимаемой жидкости

Общая теория непрерывных потенциальных движений несжимаемой жидкости ([2], гл. VIII, § 12). Свойства гармонических функций ([2], гл. VIII, § 12). Многозначность потенциала в многосвязных областях ([1], ч. I, гл. I, § 18). Кинематическая задача о произвольном движении твердого тела в неограниченном объеме идеальной несжимаемой жидкости ([2], гл. VIII, § 14). Энергия, количество движения и момент количества движения жидкости при движении в ней твердого тела ([2], гл. VIII, § 15). Движение сферы в идеальной жидкости ([2], гл. VIII, § 13).

Силы воздействия идеальной жидкости на тело, движущееся в безграничной массе жидкости ([2], гл. VIII, § 16). Основы теории присоединенных масс ([2], гл. VIII, § 15). Парадокс Даламбера ([2], гл. VIII, §§ 8, 16).

Плоские движения идеальной жидкости. Функция тока. Применение методов теории аналитических функций комплексного переменного для решения плоских задач гидродинамики и аэродинамики ([1], ч. I, гл. III, §§ 11–16; [5], §§ 39, 40). Стационарное обтекание жидкостью цилиндра и профиля ([5], § 41). Формулы Чаплыгина и теорема Жуковского ([1], ч. I, гл. VI, §§ 5, 6; [5], § 44). Правило Жуковского и Чаплыгина определения циркуляции вокруг крыльев с острой задней кромкой ([1], ч. I, гл. VI, § 7; [5], § 41). Нестационарное обтекание профилей ([1\*], гл. I, §§ 1–5).

Плоские задачи о струйных течениях жидкости. Обтекание тел с отрывом струй. Схемы Кирхгофа, Эфроса и др. ([1], ч. I, гл. VI, § 16; [5], § 47; [1\*], гл. V, § 4).

Определение поля скоростей по заданным вихрям и источникам ([1], ч. I, гл. V, § 11; [2], гл. VIII, § 26). Формулы Био — Савара. Прямолинейный и кольцевой вихри ([1], ч. I, гл. V, §§ 12–15; [2], гл. VIII, § 27). Законы распределения давлений, силы, обуславливающие вынужденное движение прямолинейных вихрей в плоском потоке ([2], гл. VIII, § 28).

Постановка задачи и основные результаты теории крыла конечного размаха. Несущая линия и несущая поверхность ([2], гл. VII, § 27; [5], § 68).

Постановка задачи Коши — Пуассона о волнах на поверхности тяжелой несжимаемой жидкости ([1], ч. I, гл. VIII, §§ 2, 3; [3\*], § 24). Гармонические волны. Фазовая и групповая скорость. Дисперсия волн ([1], ч. I, гл. VII, § 8; [3\*], § 24; [7\*], §§ 11.1, 11.2, 11.4). Перенос энергии прогрессивными волнами ([1], ч. I, гл. VII, §§ 18–19; [7\*], § 11.6). Теория мелкой воды ([4], § 108; [7\*], § 13.10). Уравнения Буссинеска и Кортевега — де-Вриза. Нелинейные волны. Солитон ([7\*], §§ 13.11, 13.12; [3\*], § 24).

## 8. Движение вязкой жидкости. Теория пограничного слоя. Турбулентность

Ламинарное движение несжимаемой вязкой жидкости. Течения Куэтта и Пуазейля ([1], ч. II, гл. II, §§ 11, 12; [2], гл. VIII, § 21). Течение вязкой жидкости в диффузоре ([8], гл. V, §§ 6, 9; гл. X, §§ 3, 4; [4], § 23). Диффузия вихря ([2], гл. VIII, § 30).

Приближения Стокса и Озеена. Задача о движении сферы в вязкой жидкости в постановке Стокса ([1], ч. II, гл. II, §§ 23, 25; [2], гл. VIII, § 20; [4], § 20).

Ламинарный пограничный слой ([2], гл. VIII, § 23; [10], гл. VII, § 1). Задача Блазиуса ([2], гл. VIII, § 24; [10], гл. VII, § 5). Интегральные соотношения и основанные на их использовании приближенные методы в теории ламинарного пограничного слоя ([5], § 89). Явление отрыва пограничного слоя ([5], § 86; [4], §§ 39, 40; [10], гл. VII, § 2). Устойчивость погранич-

ного слоя ([4], § 41; [10], гл. XVI, §§ 2, 3). Теплообмен с потоком на основе теории пограничного слоя ([4\*], гл. VI, § 2; [5] §§ 114–116; [10], гл. XII, §§ 1, 4).

Турбулентность ([5], § 95). Опыт Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса ([2], гл. VIII, § 22). Турбулентный перенос тепла и вещества ([5], §§ 97, 98). Полуэмпирические теории турбулентности ([5], § 98; [10], гл. XIX, §§ 2–4; ([9], гл. III, § 4).). Профиль скорости в пограничном слое. Логарифмический закон ([5], § 120; [10], гл. XIX, § 5). Прямое численное решение уравнений гидромеханики при наличии турбулентности ([5\*]).

Свободная и вынужденная конвекция ([6\*], гл. II, § 5; ([9], гл. V, §§ 16, 18).). Приближение Буссинеска ([6\*], гл. I, § 1). Линейная неустойчивость подогреваемого плоского слоя и порог возникновения конвекции. ([6\*], гл. II, § 5). Понятие о странном аттракторе ([4], §§ 30, 31).

Движение жидкости и газа в пористой среде. Закон Дарси. Система дифференциальных уравнений подземной гидрогазодинамики ([4\*], гл. I, § 1, гл. II, § 1). Неустановившаяся фильтрация газа. Примеры точных автомодельных решений ([4\*], гл. VIII, § 8).

## 9. Движение сжимаемой жидкости. Газовая динамика

Распространение малых возмущений в сжимаемой жидкости. Волновое уравнение. Скорость звука ([4], §§ 64–68; [2], гл. VIII, § 17).

Запаздывающие потенциалы. Эффект Допплера. Конус Маха ([2], гл. VIII, § 17; [4], § 68). Уравнения газовой динамики. Характеристики. ([1], ч. II, гл. I, § 4; [6], гл. II, §§ 3, 4; [3\*], § 25).

Влияние сжимаемости на форму трубок тока при установившемся движении. Элементарная теория сопла Лавалья ([2], гл. VIII, § 6; [2\*], гл. IV, § 1).

Одномерные неустановившиеся движения газов с плоскими, цилиндрическими и сферическими волнами ([3], гл. IV, § 1). Автомодельные движения и классы соответствующих задач ([3], гл. IV, § 1–3). Задачи о поршне и о сильном взрыве в газе ([3], гл. IV, §§ 1, 6, 11, 12; [6], гл. II, §§ 8, 10, 16).

Волны Римана. Эффект опрокидывания волн ([2], гл. VIII, § 18; [6], гл. II, § 7). Адиабата Гюгонио ([4], § 85). Теорема Цемплена ([4], §§ 86, 87). Эволюционные и неэволюционные разрывы ([4], § 88; [6], гл. II, § 9; [3\*], § 25).

Теория волн детонации и горения ([4], §§ 128–131; [3\*], § 25). Правило Жуге и его обоснование ([4], § 130).

Задача о структуре сильного разрыва ([1], ч. II, гл. II, § 19; [4], § 93; [3\*], § 25).

Качественное описание решения задачи о распаде произвольного разрыва ([4], § 100).

Плоские стационарные сверхзвуковые течения газа. Метод характеристик ([6], гл. III, § 7, 8). Течение Прандтля — Майера ([6], гл. III, § 10). Косой скачок уплотнения. Обтекание сверхзвуковым потоком газа клина и конуса. Понятие об обтекании тел газом с отошедшей ударной волной ([6], гл. III, §§ 14–16; [1], ч. II, гл. I, § 27).

Линейная теория обтекания тонких профилей и тел вращения ([4], §§ 123–125; [6], гл. III, §§ 18–20).

Течения с гиперзвуковыми скоростями. Закон сопротивления Ньютона ([4], § 126; [6], гл. III, §§ 22, 23).

## 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 ([2], гл. VI, § 4). Уравнения импульса и притока тепла для проводящей среды ([2], гл. VI, § 4; [7], гл. I, § 2; [3\*], § 35).

Уравнения магнитной гидродинамики ([2], гл. VI, § 6; [7] гл. I, § 4; [3\*], § 36). Условия замороженности магнитного поля в среду ([2], гл. VI § 7; [7], гл. I, § 5). Понятие о поляризации и намагничивании жидкостей ([2], гл. VI, §§ 1, 5).

## 11. Физическое подобие, моделирование

Система определяющих параметров для выделенного класса явлений ([3], гл. I, §§ 1, 7). Основные и производные единицы измерения. Формула размерностей ([3], гл. I, §§ 2–4). П-теорема ([3], гл. I, § 6). Примеры приложений. Определение физического подобия. Моделирование. Критерии подобия ([3], гл. II, § 6). Числа Эйлера, Маха, Фруда. Рейнольдса, Струхала, Прандтля ([5], §§ 77, 85, 109).

### Основная литература

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. I, ч. II. М.: Физматгиз, 1963.
2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. I, т. II, изд. 5, М.: Наука, 1994.
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике, изд. 10. М.: Наука, 1987.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Изд. 3. М.: Наука, 1986.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5. Н.: Наука, 1978.
6. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988.
7. Куликовский А.Г., Любимов Г.А. Магнитная гидродинамика. М.: Физматгиз, 1962.
8. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. изд.-во физ.-тех. лит-ры, 1955.
9. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. РХД, 2000.
10. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

### Дополнительная литература

1. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. Изд. 3. М.: Наука, 1980.
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
3. Галин Г.Я., Голубятников А.Н., Каменярж Я. А., Карликов В.П., Куликовский А.Г., Петров А.Г., Свешникова Е.И., Шикина И.С., Эглит М.Э. Механика сплошных сред в задачах. Т. 1, 2. М.: Московский лицей, 1996.
4. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963.
5. Липанов А.М., Кисаров Ю.Р., Ключников И.Г. Численный эксперимент в классической гидромеханике турбулентных потоков. Изд-во Ур. ОРАН, Екатеринбург, 2001 г.
6. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
7. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.

Разработал:

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. А.К. Хе