

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

по науке и инновациям

Комаров И.И.

« ____ » _____ 2026 г.

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ
ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ В
АСПИРАНТУРУ**

Группа научных специальностей – 1.1. Математика и механика

Научная специальность – 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы

Москва, 2026

1. Механика жидкости и газа

Понятие сплошной среды. Микроскопические и статистические макроскопические феноменологические методы описания свойств, взаимодействий и движений материальных сред. Области приложения механики жидкости, газа и плазмы.

Кинематика жидкости. Способы описания движения среды по Лагранжу и Эйлеру. Поступательное, вращательное и деформационное движение жидкой частицы. Тензор «векторный градиент». Теоремы Гельмгольца. Теорема Стокса. Особенности безвихревого (потенциального) течения. Полная (субстанциональная) производная.

Динамика жидкости. Уравнение неразрывности и движения жидкости. Силы, действующие в жидкости – массовые и поверхностные. Напряжения. Вывод уравнения движения «в напряжениях», его физический смысл. Классификация моделей жидкости.

Уравнение сохранения энергии в движущейся среде; плотность потока полной энергии; различные формы дифференциального уравнения энергии. Уравнение сохранения массы компонента в бинарной смеси; влияние диффузионного потока массы компонента на перенос импульса и энергии в бинарной смеси. Аналогия процессов переноса импульса, энергии и массы компонента в смеси.

Динамика идеальной жидкости. Уравнение движения в форме Эйлера. Условия однозначности. Уравнение движения идеальной жидкости в форме Громеки – Лэмба. Теорема Бернулли, интеграл Бернулли. Движение идеальной сжимаемой жидкости. Обобщенная теорема Бернулли. Критерий сжимаемости.

Плоское стационарное течение. Функция тока, её связь с потенциалом скорости. Линии тока и эквипотенциальные линии. Метод суперпозиции. Поперечное обтекание цилиндра идеальной жидкостью. Парадокс Даламбера. Поперечное обтекание с циркуляцией. Формула Жуковского о подъемной силе. Подъемная сила крыла. Постулат Чаплыгина – Жуковского.

Гидростатика. Абсолютное и относительное равновесие. Закон Паскаля, закон Архимеда. Равновесие жидкости в поле силы тяжести и тел, плавающих в жидкости. Понятие устойчивости.

Динамика вязкой жидкости. Особенности течения вязкой жидкости. Гипотезы Стокса. Обобщенный закон Ньютона для вязкой жидкости. Уравнения Навье - Стокса. Граничные условия течений вязкой жидкости.

Подобие физических явлений. Теоремы теории подобия. Подобие и аналогия. Теория подобия как научная основа экспериментальных исследований. Теория подобия и моделирование. Физический смысл чисел подобия в механике однофазных и двухфазных систем, в процессах конвективного тепло- и массообмена. Теория размерностей. П-теорема.

Ламинарные течения. Стационарное течение Куэтта. Ламинарное стационарное течение в круглой трубе. Понятие о гидродинамической стабилизации. Стабилизированное течение в круглой трубе. Формула Пуазейля для расчета коэффициента гидравлического сопротивления. Течение на начальном гидродинамическом участке круглой трубы. Решение Тарга.

Ламинарный пограничный слой. Понятие пограничного слоя. Уравнения пограничного слоя. Пограничный слой при продольном обтекании тонкой пластины (задача Блазиуса). Пограничный слой при наличии продольного градиента давления. Явление отрыва пограничного слоя. Управление пограничным слоем.

Система уравнений температурного пограничного слоя. Анализ теплообмена при ламинарном течении в погранслое методами размерностей. Теплообмен при ламинарном обтекании изотермической пластины; анализ предельных по числу Прандтля случаев.

Турбулентные течения. Определение турбулентности. Потеря устойчивости и переход от ламинарного течения к турбулентному в трубах, в пограничном слое. Коэффициент перемежаемости. Опыты Ротта. Первое и второе критические числа Рейнольдса. Элементы теории устойчивости. Энергетический метод. Метод малых возмущений. Уравнение Орра – Зоммерфельда, нейтральная кривая. Статистический подход Рейнольдса. Уравнения Рейнольдса и проблема незамкнутости.

Полуэмпирические модели турбулентности. Механизм турбулентного переноса импульса и методы его моделирования. Гипотеза Прандтля о «длине пути перемешивания». Аналогия Рейнольдса для теплообмена при турбулентном течении в пограничном слое. Стационарное гидродинамически стабилизированное турбулентное течение в трубе. Двухслойная модель Прандтля. Универсальный логарифмический профиль скорости. Модели Кармана, Рейхардта.

Стабилизированный теплообмен в трубах при ламинарном и турбулентном течении. Тепловой баланс, среднемассовая скорость и температура. Интеграл Лайона.

Свободная конвекция в пограничном слое и в замкнутых объемах. Приближение Буссинеска, максимальная скорость свободной конвекции. Свободная конвекция на вертикальной плоскости при ламинарном и турбулентном течении. Свободная конвекция у поверхности горизонтального цилиндра и сферы. Свободная конвекция на горизонтальной плоскости, в прослойках и в замкнутых объемах.

2. Динамика многофазных систем

Модели двухфазных систем. Метод контрольной ячейки, модель отдельного течения, модель взаимопроникающих континуумов, гомогенная модель. Уравнения сохранения для двухфазных сред. Универсальные условия совместности. Специальные условия совместности в задачах теплообмена.

Гидростатика газожидкостных систем. Смачиваемость, краевой угол. Формула Лапласа. Высота подъема жидкости в капиллярах. Осесимметричные равновесные поверхности раздела. Условия отрыва капель и пузырьков с плоской поверхности и со среза капилляра в гидростатическом приближении.

Волны малой амплитуды на поверхности жидкости. Классические задачи о гидродинамической устойчивости плоской границы раздела фаз. Неустойчивость

Гельмгольца. Неустойчивость Тейлора. Приложения задач об устойчивости в теории теплообмена.

Общие закономерности стекания гравитационных пленок. Ламинарное течение пленок с плоской поверхностью. Анализ устойчивости поверхности пленок, распад тонких пленок. Гидродинамика турбулентных пленок. Теплообмен при стекании пленок.

Движение дискретной частицы в сплошной среде. Классические задачи о движении сферы в идеальной жидкости. Присоединенная масса. Задача Стокса об обтекании сферы вязкой жидкостью. Качественные закономерности движения газовых пузырьков в жидкости, скорость всплытия при характерных режимах обтекания. Движение капель в потоке газа; скорость витания; условия дробления. Капли и пузырьки в турбулентных потоках несущей фазы.

Динамика неустановившегося движения паровых пузырей в жидкости. Уравнение Рэлея. Поле давлений в жидкости. Кавитационное схлопывание газовой полости. Рост парового пузыря в объеме жидкости: анализ предельных схем, формула Плессета-Цвика, решение Скривена; аналитическое решение для области низких давлений. Условие отрыва паровых пузырей от твердой стенки.

Количественные характеристики двухфазных потоков в каналах. Расходные и «истинные» паросодержания, скорости и плотности. Структура (режимы течения) двухфазных потоков; карты режимов течения; методы расчета границ режимов. Одномерные уравнения сохранения для двухфазных потоков в каналах.

Расчет осредненных истинных параметров в потоках квазигомогенной структуры. Гомогенная модель для расчета сопротивления. Модели кольцевых двухфазных течений. Изменение структуры и закономерностей теплообмена по длине парогенерирующего канала. Кризисы кипения жидкостей при течении в трубах.

3. Газовая динамика

Уравнения газовой динамики: неразрывности, движения и энергии. Предельная скорость движения газа. Число Маха и приведенная скорость.

Одномерные газовые потоки. Звуковые волны. Скорость звука. Излучение звука. Волны конечной интенсивности. Инварианты Римана. Характеристики. Механизм образования скачков уплотнения. Прямые скачки уплотнения. Ударная адиабата. Скорость распространения ударной волны и спутного потока за ней. Элементарная теория ударной трубы. Косые скачки уплотнения.

Теория мелкой воды. Волны детонации и горения в газах. Устойчивость плоского фронта пламени при медленном горении. Общие условия перехода от дозвукового течения к сверхзвуковому и обратно.

Плоские течения невязкого газа. Общие уравнения. Метод малых возмущений. Дозвуковые течения при малых возмущениях.

Сверхзвуковые течения при малых возмущениях. Характеристики 1-го и 2-го рода. Обтекание малого угла сверхзвуковым потоком. Обтекание тонкого профиля сверхзвуковым потоком газа. Волны разрежения. Центрированные волны. Общая задача о двумерном стационарном движении газа. Уравнение Чаплыгина.

Течение газа в соплах и диффузорах. Дозвуковые и сверхзвуковые диффузоры. Диффузоры с внешним и внутренним сжатием. Формы сопел. Сопло с центральным телом. Эжекторное сопло. Истечение сверхзвуковой газовой струи из сопла на нерасчетном режиме.

Элементы газовой динамики крылового профиля и прямолинейной решетки. Обтекание конечных тел. Ламинарный и турбулентный след. Дозвуковое обтекание тонкого крыла. Обтекание решетки профилей потоком несжимаемой жидкости и дозвуковым потоком газа.

Обтекание решетки сверхзвуковых профилей невязким потоком газа.

4. Турбулентность

Статистический подход к исследованию турбулентности. Случайное турбулентное поле и его свойства. Плотность вероятности. Стационарные, однородные и изотропные поля. Способы осреднения. Понятие об эргодичности. Моменты скалярного случайного поля. Математическое ожидание. Дисперсия. Коэффициенты асимметрии и эксцесса. Корреляционная функция. Коэффициент автокорреляции и временные масштабы. Пространственная корреляционная функция скалярного поля. Моменты случайного векторного поля. Одноточечные моменты поля скорости. Корреляционные функции поля турбулентных пульсаций скорости. Нормальный закон распределения. Коэффициент пространственно-временной корреляции. Гипотеза Тейлора о «замороженной» турбулентности.

Спектральное представление однородных полей и стационарных процессов. Понятие о спектральной плотности. Спектральное разложение на конечном временном интервале. Ряд Фурье. Разложение случайного процесса на бесконечном временном интервале. Интеграл Стилтеса. Свойства временных спектров. Теорема Винера-Хинчина. Частотные спектры и временные масштабы. Спектры однородного скалярного и векторного полей. Одномерные и трехмерные спектры.

Динамика турбулентности. Осредненные уравнения турбулентного движения. Проблема незамкнутости. Метод Келлера-Фридмана получения уравнений для старших моментов. Уравнения энергетического баланса. Баланс полной энергии, энергии осредненного и пульсационного движения. Схема Лауфера – Таунсенда. Баланс дисперсии пульсаций температуры. Современные представления о пристенной турбулентности. Явление обновления вязкого подслоя. Когерентные структуры. Динамические уравнения для корреляционных функций и спектров однородной турбулентности. Локальная однородность и локальная изотропия. Спектры изотропной турбулентности. Перенос энергии по спектру. Каскадная модель Ричардсона. Гипотезы Колмогорова. Модель K41 и K62. Законы сохранения и инерционные интервалы.

5. Физика плазмы

Плазма в природе и лабораторных исследованиях, плазма как рабочее тело различных технических установок. Механизмы поведения взаимодействующих заряженных частиц во внешних электрических и магнитных полях. Ларморовский радиус и дрейфовая скорость. Роль столкновений. Основные свойства плазмы.

Элементарные процессы в плазме. Энергетические уровни атомов и молекул. Процессы возбуждения и ионизации. Сечения столкновений и ионизации. Термически равновесная плазма. Условия возникновения разности температур электронов и тяжелых частиц в термической плазме.

Коллективные процессы. Экранированный электрический потенциал. Уравнения Максвелла. Волновое уравнение, описывающее распространение электромагнитных волн. Плазменные колебания и их влияние на распространение электромагнитной волны в плазме.

Термодинамика слабонеидеальной плазмы. Теория Дебая и экранированный электрический потенциал. Энергия кулоновского взаимодействия частиц. Параметр неидеальности плазмы. Различные виды ионизационного равновесия. Термическая ионизация. Уравнение Саха. Влияние неидеальности плазмы на ионизационное равновесие. Параметр вырождения. Фазовый переход металл – диэлектрик.

Кинетическая теория частично ионизированной плазмы во внешних электрических и магнитных полях. Уравнение Больцмана для плазмы и методы его решения. Интеграл столкновений. Уравнение Власова. Уравнение Фоккера - Планка. Бесстолкновительное затухание Ландау.

Расчет коэффициентов переноса в слабоионизованной плазме. Влияние магнитного поля на коэффициенты переноса. Эффекты Холла и Риги-Людока. Вывод уравнений гидродинамики для плазмы из электронов, ионов и атомов.

Перенос излучения в плазме. Механизмы генерации излучения. Уравнение переноса излучения. Оптическая толщина излучающего слоя. Метод решения уравнения переноса излучения. Потери на излучения в оптически толстом и оптически тонком слоях. Перенос излучения в линиях. Уравнение Бибермана-Холстейна. Уравнение Абеля и метод его решения.

Неустойчивости и волны в низкотемпературной плазме. Основные неустойчивости в плотной низкотемпературной плазме: акустическая, перегревная, ионизационная, ионизационно-перегревная. Типы волн в плазме. Ионизационные волны в плазме с магнитным полем.

Высокотемпературная плазма. Плазменная турбулентность. Слабая турбулентность. Основные понятия о свойствах высокотемпературной, полностью ионизованной плазма в космосе и лабораторных установках. Методы удержания плазмы. Основные методы получения высокотемпературной плазмы и исследования её свойств и процессов в ней.

Турбулентность и её влияние на процессы переноса энергии и частиц. Турбулентные коэффициенты переноса. Неклассические механизмы переноса частиц и энергии.

5. Магнитная газодинамика

Электродинамика в сплошной среде. Основные законы. «Ток проводимости», «ток поляризации», «ток смещения». Уравнения Максвелла - составная часть уравнений электромагнитной газодинамики. Электромагнитные силы. Напряжения Максвелла. Вектор Умова-Пойнтинга. Обобщенный закон Ома. Эффект Холла. «Ток конвекции».

Уравнение баланса энергии электромагнитного поля в сплошной среде. Электромагнитные волны. Уравнение движения. Баланс кинетической энергии потока. Уравнение для «полной» энергии потока. Баланс внутренней энергии потока. Джоулева диссипация энергии. Система уравнений электромагнитной газодинамики. Взаимное преобразование энергии электромагнитного поля и механической энергии потока.

Интегральная форма уравнений Максвелла. Условия совместности на границах для задач электромагнитной газодинамики.

Приближение магнитной газодинамики. Уравнения для магнитной индукции. Магнитная диффузия. Скин-эффект. Конвекция магнитного поля в сплошной среде. «Вмороженность» магнитного поля в среду. Теорема Альфвена, теорема Валена. Магнитная спиральность. Влияние диффузии на динамику магнитного поля.

Безразмерные критерии магнитной газодинамики и их физический смысл. Критерии Стюарта и Гартмана.

Волны Альфвена. Условия возникновения и механизм распространения. Проблема МГД-динамо.

Квазилинейное и квазистатическое МГД-приближения. Уравнение для электрического потенциала. Влияние магнитного поля на гидродинамику жидкости - «псевдо-диффузия», «двумеризация» и образование пограничных слоев. Магнетогидростатика. Магнитное давление.

Установившиеся плоскопараллельные МГД-течения в каналах. Течение Гартмана. Режимы работы МГД-канала. Анализ режимов с помощью закона Ома. Гидравлическое сопротивление в задаче Гартмана.

Влияние проводимости стенок на гидравлическое сопротивление в задаче Гартмана. Относительная проводимость стенки.

Теплообмен при однородном обогреве $q = \text{const}$ в задаче Гартмана. Учет внутренних источников тепловыделения в задаче о теплообмене при течении Гартмана. Адиабатическая температура стенки.

Особенности гидродинамики и теплообмена при плоскопараллельном течении в прямоугольных каналах и круглой трубе и поперечном магнитном поле. Влияние неоднородности магнитного поля («концевые эффекты») на гидродинамику канальных течений в магнитном поле.

Подавление турбулентности в канальных течениях в магнитном поле. Критическое число Рейнольдса при течении в каналах в магнитном поле.

Основная литература

1. Ягов, В. В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях : учебное пособие / В. В. Ягов. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2019. — 542 с. — ISBN 978-5-383-01386-1.
2. Механика двухфазных систем : учебное пособие для вузов по направлению "Техническая физика" / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов . – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательский дом МЭИ, 2022 . – 384 с. - ISBN 978-5-383-01229-1.

3. Глазков В.В. Динамика многофазных систем: Учебное пособие. Спб.: Издательство «Лань», 2018. 172 с.
4. Введение в механику жидкости: учебное пособие для вузов по направлениям "Техническая физика", "Теплоэнергетика" / Е. П. Валуева, В. Г. Свиридов . – 3-е изд., перераб . – М. : Изд. дом МЭИ, 2022 . – 227 с. - ISBN 978-5-383-01566-7.
5. Глазков В.В. Техническая газодинамика. Спб.: Лань, 2018. 108 с.
6. Механика несжимаемых и сжимаемых жидкостей : учебник для вузов по направлению "Энергетическое машиностроение" и "Теплоэнергетика и теплотехника" / А. Е. Зарянкин . – М. : Изд. дом МЭИ, 2014 . – 590 с. - ISBN 978-5-383-00903-1 .
7. Теплообмен в ядерных энергетических установках : учебное пособие для вузов по специальностям "Теплофизика" и "Атомные электрические станции и установки" направления "Техническая физика" / Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалев, и др. . – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2025 . – 548 с. - ISBN 978-5-383-01746-3.
8. Л.Г.Генин, В.Г.Свиридов. Введение в статистическую теорию турбулентности: учебное пособие для ВУЗов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 154 с.
9. Синкевич О.А. Волны и неустойчивости в сплошных средах. Учебн. пособие. – М.: Изд. МЭИ. 2016. 263 с.
10. Генин, Л. Г. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах / Л. Г. Генин, В. Г. Свиридов . – М. : Изд-во МЭИ, 2001 . – 200 с. - ISBN 5-7046-0650-4
11. Куликовский, А. Г. Магнитная гидродинамика : учебное пособие для вузов по группе направлений и специальностей "Механика" / А. Г. Куликовский, Г. А. Любимов, Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова (МГУ) . – 3-е изд . – М. : Логос, 2011 . – 328 с. – (Классический университетский учебник) . - 250 лет МГУ им. М.В. Ломоносова . - ISBN 978-5-94010-556-5 .
12. Кирко, И. М. Магнитная гидродинамика. Современное видение проблем / И. М. Кирко, Г. Е. Кирко . – М. : Ин-т компьют. исслед. ; Ижевск : РХД, 2009 . – 632 с. - ISBN 978-5-93972-752-5 .
13. Брановер, Г. Г. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред / Г. Г. Брановер, А. Б. Цинобер . – М. : Наука, 1970 . – 379 с.

Дополнительная литература

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учебное пособие : в 10 томах / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под редакцией Л. П. Питаевского. — 6-е изд., испр. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2021 — Том 6 : Гидродинамика — 2021. — 728 с. — ISBN 978-5-9221-1625-1.
2. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учебное пособие / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — 4-е изд., стер. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, [б. г.]. — Том 8 : Электродинамика сплошных сред — 2005. — 656 с. — ISBN 5-9221-0123-4.

3. Фрик, Петр Готлобович. Турбулентность: подходы и модели / П. Г. Фрик. - Изд. 2-е, испр. и доп. - Москва ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2010. - 330 с. : ил
4. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Интеллект. 2008.
5. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках : учебное пособие для вузов по специальности "Атомные электрические станции и установки" / П. Л. Кириллов, Г. П. Богословская . – 2-е изд., перераб . – М. : Энергоатомиздат, 2008 . – 256 с. - ISBN 978-5-86656-210-7 .
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. Для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с., 311 ил., 22 табл.
7. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М. : Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
8. Кутателадзе С. С, Накоряков В. Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984. 303 с.
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. В 2 Ч. М.: Наука, 1991. 824 с.
10. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. 592 с.
11. Ватажин, Любимов, Регирер. Магнитогидродинамические течения в каналах/ - М. Наука, 1970
12. Шерклиф. Курс магнитной гидродинамики. М. Мир, 1967 г.
13. Саттон Д., Шерман А. Основы технической магнитной газодинамики. Изд. МИР, М., 1968
14. Бай Ши-и. Магнитная газодинамика и динамика плазмы. Изд. МИР, 1964.

«Согласовано»
Зав.каф. ИТФ
д.ф.-м.н., доцент

Герасимов Д.Н.

«Согласовано»
И.о. директора ИТАЭ
д.т.н., доцент

Дудолин А.А.