

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор института-заместитель
директора ФАКТ**

М.А. Кудров

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Асимптотическая теория отрыва
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Авиационные технологии
	Физтех-школа авиационных и цифровых технологий
	кафедра аэрофизики и летательных аппаратов
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.Б. Заметаев

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизики и летательных аппаратов 04.03.2025

Аннотация

Курс содержит описание классического подхода к исследованию вязких отрывных ламинарных течений жидкости и газа около различных твёрдых тел. Методом исследования течений, является поиск и анализ асимптотики решения уравнений Навье-Стокса при стремлении числа Рейнольдса к бесконечности. В результате освоения курса, студенты получают современные представления о методологии изучения различных течений и способах выделения основных, физически значимых явлений в отрывных потоках жидкости и газа.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по отрывным течениям вязких жидкостей и газа для дальнейшего использования в других областях механики жидкости и газа и дисциплинах естественнонаучного содержания; формирование физической и математической культуры, исследовательских навыков и способности применять знания на практике.

Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся базовых знаний по отрывным течениям вязких жидкостей и газа;
- формирование математической и физической культуры: умение формулировать краевые задачи для течений вблизи точек отрыва, обучение методам аналитического исследования краевых задач, умение логически мыслить, проводить доказательства основных утверждений, устанавливать логические связи между понятиями и гидродинамическими явлениями.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость

на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- двух- и трехмерные уравнения Навье-Стокса, Эйлера и пограничного слоя и возможные граничные условия;
- существующие асимптотические методы;
- предельное состояние поля течения при больших числах Рейнольдса;
- пределы применимости теории Прандтля;
- основы теории отрыва потока от гладкой поверхности;
- современные представления о глобальном отрыве;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- формулировать постановку задачи для плоского пограничного слоя;
- математически сформулировать краевую задачу со взаимодействием при обтекании задней кромки пластины и гладком отрыве;
- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций.

владеть:

- аналитическими методами исследования отрывных течений;
- методами расчета плоского пограничного слоя на режиме вязко- невязкого взаимодействия;
- математическим моделированием физических задач.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение	4			
2	Постановка задач отрывного обтекания	4			5
3	Теория пограничного слоя Прандтля	4			5
4	Обтекание пластины конечной длины при больших числах Рейнольдса	4			5
5	Особенность Гольдштейна	4			5
6	Асимптотическая теория ламинарного отрыва от гладкой поверхности	5			5
7	Обтекание тел конечной толщины при больших числах Рейнольдса	5			5
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

1. Введение

Метод сращиваемых асимптотических разложений: асимптотические разложения, функции сравнения, равномерная пригодность, сращивание асимптотических разложений.

2. Постановка задач отрывного обтекания

Физическая и математическая постановка задач отрывного обтекания. Неединственность решения в рамках теории течений идеальной жидкости.

3. Теория пограничного слоя Прандтля

Предельное состояние поля течения при больших числах Рейнольдса и теория пограничного слоя Прандтля. Критерий отрыва потока.

4. Обтекание пластины конечной длины при больших числах Рейнольдса

Обтекание пластины конечной длины, установленной под нулевым углом атаки, при больших числах Рейнольдса: а) пограничный слой Блазиуса и ближний след Гольдштейна, б) теория взаимодействия для течения около задней кромки пластины, в) формула для коэффициента сопротивления пластины и сравнение с результатами численных решений и экспериментом.

5. Особенность Гольдштейна

Анализ структуры особенности Гольдштейна, возникающей в точке нулевого поверхностного трения при заданном регулярном положительном градиенте давления (классический подход). Основы теории кромочного отрыва.

6. Асимптотическая теория ламинарного отрыва от гладкой поверхности

Структура предельного состояния поля течения при стремлении числа Рейнольдса к бесконечности. Условие гладкого схода свободной линии тока (условие Бриллюэна-Вилля). Структура пограничного слоя и оторвавшегося слоя смещения. Течение в области взаимодействия. Закон подобия и результаты численного решения краевой задачи для области взаимодействия.

7. Обтекание тел конечной толщины при больших числах Рейнольдса

Обтекание тел конечной толщины при больших числах Рейнольдса. Структура течения в целом.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Введение в методы возмущений [Текст]/А. Найфэ, -М., Мир, 1984
2. Асимптотическая теория сверхзвуковых течений вязкого газа [Текст]/В. Я. Нейланд [и др.], -М., Физматлит, 2004

Дополнительная литература

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://lib.mipt.ru/catalogue/> – электронная библиотека Физтех.
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Не используются

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий курс отрывных течений, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные понятия метода сращиваемых асимптотических разложений, основы течений вязкого газа, оценки для параметров течения в пограничном слое, физическую постановку и математическую формулировку краевой задачи обтекания задней кромки плоской пластины. Краевую задачу для обтекания гладкого тела с формированием отрыва. Студент должен уметь применять полученные знания для решения различных гидродинамических задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе);
- подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях;
- подготовку к экзамену.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Авиационные технологии
Физтех-школа авиационных и цифровых технологий
кафедра аэрофизики и летательных аппаратов
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: В.Б. Заметаев

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Асимптотическая теория отрыва» обучающийся должен:

знать:

- двух- и трехмерные уравнения Навье-Стокса, Эйлера и пограничного слоя и возможные граничные условия;
- существующие асимптотические методы;
- предельное состояние поля течения при больших числах Рейнольдса;
- пределы применимости теории Прандтля;
- основы теории отрыва потока от гладкой поверхности;
- современные представления о глобальном отрыве;
- о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.

уметь:

- формулировать постановку задачи для плоского пограничного слоя;
- математически сформулировать краевую задачу со взаимодействием при обтекании задней кромки пластины и гладком отрыве;
- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций.

владеть:

- аналитическими методами исследования отрывных течений;
- методами расчета плоского пограничного слоя на режиме вязко- невязкого взаимодействия;
- математическим моделированием физических задач.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Текущий контроль заключается в учете посещения студентами лекций, а также в учете тех или иных видов активности студентов на лекциях: выполнения домашних заданий, решения задач на семинаре, обсуждения возникающих вопросов по текущему материалу и т.п. Данные по текущему контролю учитываются как при выставлении оценок.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

1. Объяснить причины появления асимптотических методов в механике жидкости и газа, указать некоторые из них;
2. Выписать уравнения пограничного слоя Прандтля в двухмерном случае, указать причины появления автомодельного решения Блазиуса;
3. Объяснить явление взаимодействия на примере обтекания задней кромки пластины;
4. Описать спектр возможных течений идеальной невязкой жидкости около толстых тел;
5. Объяснить критерий Бриллюэна-Вилля отбора невязкого решения;
6. Сформулировать задачу со взаимодействием об отрыве потока от гладкой поверхности;
7. Описать действие заданного градиента давления на пограничный слой вязкой несжимаемой жидкости;
8. Вывести особенность Гольдштейна в пограничном слое;
9. Указать способы устранения особенности Гольдштейна в пограничном слое;
10. Объяснить структуру ближнего следа Гольдштейна и его вытесняющее действие;
11. Дать решение невязкой задачи, обусловленное вытеснением следа Гольдштейна;
12. Ввести понятие вязкого подслоя вблизи задней кромки пластины, вызванного индуцированным градиентом давления;
13. Объяснить причины появления возвратных токов в вязком подслое области взаимодействия;
14. Рассказать об отрыве потока вблизи задней кромки тонкого профиля под углом атаки;
15. Дать возможные картины обтекания толстых тел с ростом числа Рейнольдса;
16. Описать явление кромочного отрыва вблизи точки нулевого поверхностного трения;
17. Описать схему численного расчета задачи об отрывном течении со взаимодействием;
18. Указать влияние области взаимодействия на сопротивление плоской пластины.

Билет 1

Объяснить причины появления асимптотических методов в механике жидкости и газа, указать некоторые из них;

Билет 2.

Выписать уравнения пограничного слоя Прандтля в двухмерном случае, указать причины появления автомодельного решения Блазиуса;

Билет 3

Объяснить явление взаимодействия на примере обтекания задней кромки пластины;

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Экзамен проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.