

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор института-заместитель  
директора ФАКТ**

**М.А. Кудров**

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