

**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:	Динамические структуры в турбулентном пограничном слое
по направлению:	Прикладная 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) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: В.А. Жаров, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизики и летательных аппаратов 04.03.2025

Аннотация

Дисциплина включает в себя изучение физического моделирования явлений, происходящих в развитом турбулентном пограничном слое в рамках уравнений Навье-Стокса на основе обобщения обширного экспериментального материала об организованных структурах – кардинально нового представления о динамике жидкости в турбулентном пограничном слое. Изучение дисциплины в том числе включает изучение турбулентного пограничного слоя, асимптотический анализ уравнений Навье-Стокса для течений при больших числах Рейнольдса, уравнений корреляций и тройное разложение.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- введение студентов в область физического моделирования явлений, происходящих в развитом турбулентном пограничном слое в рамках уравнений Навье-Стокса на основе обобщения обширного экспериментального материала об организованных структурах – кардинально нового представления о динамике жидкости в турбулентном пограничном слое.

Задачи дисциплины

- глубокое изучение физических и математических основ динамики жидкости, их применение к нетривиальным случаям динамики, тестирование результатов предлагаемого анализа, валидация, практическое применение получаемых результатов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний 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-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-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен 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-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
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-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны
знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной аэродинамики вязкого сжимаемого газа;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов аэродинамики;
- современные проблемы физики, математики;
- современное положение дел в проблеме идентификации физических механизмов образования возмущений в турбулентных течениях;
- разновидности современных способов экспериментального исследования динамики возмущений в турбулентных течениях и физические принципы, на которых они основаны.

уметь:

- абстрагироваться от несущественных факторов при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- выводить основные уравнения и понимать их физический смысл;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных 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	Турбулентность сильная и слабая	2			2
2	Турбулентный пограничный слой, Эксперимент, Исторический обзор стрики, берсты, шпильки	2			1
3	Асимптотический анализ уравнений Навье-Стокса для течений при больших числах Рейнольдса	2			1
4	Теория подобия и ее развитие Баренблаттом	3			1
5	Дисперсия волн, распадный спектр, 3- ω резонанс	3			1
6	Методы численного определения характеристик волн в пограничном слое	3			2
7	Нелинейное уравнение для спектральных амплитуд. Одномодовое приближение, малый параметр	2			2

8	Уравнения для корреляций. Тройное разложение	4			2
9	Метод многих масштабов. Уравнение для когерентной структуры	3			1
10	Выводы из полученных уравнений. Масштабы пульсаций по времени	3			1
11	Современные теории развитого турбулентного пограничного слоя RNG – теории, обтекание обратной ступеньки	3			1
Итого часов		30			15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Турбулентность сильная и слабая

Геометрия и ее инженерные приложения в науке и производстве. Задачи и предмет курса. Способы представления геометрических объектов в САПР.

2. Турбулентный пограничный слой, Эксперимент, Исторический обзор стрики, берсты, шпильки

Методы конструирования кривых. Интерполяционные полиномы Лагранжа, Ньютона, Эрмита. Параметрические сплайны, кривые Фергюссона и Безье, В-сплайны, NURBS.

3. Асимптотический анализ уравнений Навье-Стокса для течений при больших числах Рейнольдса

Основные геометрические задачи для кривых. Расчет дифференциальных характеристик. Динамические характеристики кривых. Эквидистанта. Пересечения кривых. Огибающая к семейству кривых. Расстояние от точки до кривой. Расстояние между кривыми. Сопряжение кривых.

4. Теория подобия и ее развитие Баренблаттом

Анализ гладкости кривых. Методы сглаживания. Анализ гладкости кривой, заданной таблично. Сглаживающая аппроксимация параметрических сплайнов. Отработка кривой в интерактивном режиме.

5. Дисперсия волн, распадный спектр, 3- ω резонанс

Методы математического описания поверхностей. Поверхности Кунса и Гордона. Параметрический бикубический сплайн. Составные поверхности Фергюссона и Безье. В-сплайновая и NURBS - поверхности. Отработка и согласование каркасных кривых для построения поверхности. Условия сопряжения поверхностей

6. Методы численного определения характеристик волн в пограничном слое

Сглаживающая аппроксимация при табличном задании поверхности. Фасетная аппроксимация.

7. Нелинейное уравнение для спектральных амплитуд. Одномодовое приближение, малый параметр

Основные геометрические задачи для поверхностей. Расчет дифференциальных и метрических характеристик. Пересечение поверхности с различными геометрическими объектами. Преодоление сингулярностей в задаче пересечения. Эквидистантные поверхности. Сопряжения к композициям поверхностей.

8. Уравнения для корреляций. Тройное разложение

Математические аспекты программирования обработки поверхностей на станках с ЧПУ. Планирование траектории обработки. Построение квазиэквидистантной поверхности перемещения геометрического центра инструмента. Траектория обработки в условиях ограничений. Способы обеспечения бездефектной обработки составных поверхностей.

9. Метод многих масштабов. Уравнение для когерентной структуры

Геометрическое обеспечение аддитивных технологий. Послойное деление геометрической модели объекта для заданного направления. Формирование траекторий сканирования выделенного слоя (штриховка, спираль, с контурной обводкой, по шаблону).

10. Выводы из полученных уравнений. Масштабы пульсаций по времени

Основы измерения сложных составных поверхностей на программируемых измерительных машинах. Совмещение результатов замера с математической моделью измеряемого изделия. Ошибка базирования. Оценка объема измерений для выявления ошибки базирования. Разделение погрешностей изготовленной поверхности с аэродинамической профилировкой. Методика измерения поверхностей с аэродинамической профилировкой (крыло, лопасть винта, лопасть вентилятора или газотурбинного двигателя).

11. Современные теории развитого турбулентного пограничного слоя RNG – теории, обтекание обратной ступеньки

Преобразование геометрических описаний (масштабирования, сдвиг, вращения, отражения, перенос). Кватернионы. Обобщенная матрица преобразования. Проекции.

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

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

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теоретические основы методов определения в полете летных характеристик самолетов. Применение теории подобия [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / М. А. Тайц .— М. : Машиностроение, 1983 .— 128 с.
2. Летные испытания самолетов и обработка результатов испытаний [Текст] : учеб. пособие для вузов / И. М. Пашковский, В. А. Леонов, Б. К. Поплавский .— М. : Машиностроение, 1985 .— 415 с.

Дополнительная литература

1. Динамика полета. Устойчивость и управляемость летательных аппаратов [Текст]. Ч. 2 : учебник для вузов / И. В. Остославский, И. В. Стражева .— М. : Машиностроение, 1965 .— 467 с.

2. Компьютерное моделирование задач механики полета [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Завершнеv ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т), Летно-исслед. ин-т им. М. М. Громова .— М. : МФТИ, 2013 .— Ч. 1 : Введение в математические методы. - 2013. - 218 с.

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

Не используются

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

мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, изучающий курс «Динамические структуры в турбулентном пограничном слое», 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 фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики; порядки численных величин, характерные для различных разделов физики; современные проблемы физики, математики;

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 учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- подготовку к дифференцированному зачету.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций

.

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:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	В.А. Жаров, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний 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-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-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен 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-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
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-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Динамические структуры в турбулентном пограничном слое» обучающийся должен:

знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной аэродинамики вязкого сжимаемого газа;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов аэродинамики;
- современные проблемы физики, математики;
- современное положение дел в проблеме идентификации физических механизмов образования возмущений в турбулентных течениях;
- разновидности современных способов экспериментального исследования динамики возмущений в турбулентных течениях и физические принципы, на которых они основаны.

уметь:

- абстрагироваться от несущественных факторов при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- выводить основные уравнения и понимать их физический смысл;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

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

1. Возникновение турбулентности: современные физические представления о развитии ламинарно-турбулентного перехода.
2. Сценарии Ландау-Хопфа, Рюэля-Таккенса.
3. Сценарии перехода в пограничном слое на пластине.
4. Теория гидродинамической устойчивости и инженерные методы расчета ламинарно-турбулентного перехода.
5. Законы подобия А. Н. Колмогорова для однородной изотропной турбулентности и их обобщения.
6. Уравнения Рейнольдса, проблема замыкания и некоторые подходы к ее решению.
7. Слабая турбулентность.
8. Современное представление о развитом турбулентном пограничном слое.
9. Когерентные структуры в турбулентном пограничном слое
10. Модели турбулентных течений: конститутивные модели.
11. Подсеточные модели, физические модели, инженерные модели.
12. Метод многих масштабов.

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

1. Асимптотический анализ уравнений Навье-Стокса для течений при больших числах Рейнольдса. Уравнения Эйлера и пограничного слоя, области их применимости.
2. Волны в пограничном слое. Вывод уравнения для волн Толлмина – Шлихтинга.
3. 3-х волновой резонанс.
4. Аналитические методы решения спектральных задач теории устойчивости.
5. Численные методы решения спектральных задач теории устойчивости.
6. Физическая картина развития возмущений в пограничном слое на пластине под нулевым углом атаки.
7. Нелинейная динамика возмущений в пограничном слое на пластине.
8. Переходная область. Экспериментальные данные. Теория Эммонса и ее модификации.
9. Качественные следствия из прецизионных экспериментальных исследований турбулентного пограничного слоя.
10. Вывести уравнение для волн Толлмина – Шлихтинга.

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 дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.