

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**
**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)**

Физический факультет
Кафедра аэрофизики и газовой динамики



Рабочая программа дисциплины

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Направление подготовки: **03.04.02 Физика**

Направленность (профиль): **Физика. Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная ра- бота, не включая пе- риод сессии	Самостоятельная подготовка к проме- жуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные за- нятия			Консультации	Зачет	Дифференциро- ванный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	72	30			20	18	2			2
Всего 72 часа /2 зачетные единицы, из них: - контактная работа 34 часа										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	6
3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	6
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	7
5. Перечень учебной литературы.	9
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	9
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	9
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	10
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	10
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	10

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Современные проблемы теории устойчивости и турбулентности» представляет собой курс теории гидродинамической устойчивости и турбулентности.

Целью освоения курса является ознакомление студентов с 1) основами теории гидродинамической устойчивости; 2) математической формулировкой теории устойчивости течений вязкого сжимаемого газа; 3) устойчивостью плоскопараллельных течений, течений между вращающимися цилиндрами и возле искривленных поверхностей; 4) особенностями нелинейного усиления возмущений; 5) современными представлениями о структуре развитой турбулентности: прямое численное решение уравнений Навье–Стокса (DNS-метод), решение «отфильтрованных» уравнений Навье–Стокса (LES-метод), физические модели (теории) турбулентности (одно- и многопараметрические) для описания различных течений жидкости и газа. Экспериментально иллюстрируются результаты теории устойчивости. Приводится ряд экспериментальных данных, не нашедших еще математического описания. Особое место уделено нелинейному развитию возмущений в переходном пограничном слое, турбулентным пятнам, продольным структурам. Рассмотрены методы управления ламинарно-турбулентным переходом, включая МЭМС (Микро-электромеханические системы) - технологии.

Всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки студентов, материал лекционного курса увязывается с современными исследованиями в области теории гидродинамической устойчивости и турбулентности. Все практические занятия проводятся в интерактивной форме. Специально указываются темы, активно обсуждаемые в текущей профессиональной научной литературе и планах дальнейших работ в институте, в котором студенты проходят научную практику. Материал курса увязывается с общефизическими и математическими дисциплинами, изучаемыми студентами-физиками (электродинамика, высшая алгебра и т.д.) и спецкурсами, параллельно изучаемыми по данной специальности.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать основные принципы постановки теоретических и экспериментальных задач устойчивости ламинарных течений, ламинарно-турбулентного перехода и турбулентных течений; современные методы теоретических и экспериментальных исследований нестационарных течений газа; возможности современных вычислительных и экспериментальных средств исследования нестационарных течений. Уметь создавать программы расчета устойчивости ламинарных течений, а также численного моделирования ламинарных и турбулентных течений; по поставленной задаче составить схему проведения эксперимента, выбрать соответствующую экспериментальную установку и методику измерения; оценить точность получаемого результата.

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		Владеть современными теоретическими и экспериментальными методами исследования нестационарных газовых течений.

2. Место дисциплины в структуре магистерской программы

Дисциплина «Современные проблемы теории устойчивости и турбулентности» реализуется в осеннем семестре 2-го курса магистратуры для студентов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой аэрофизики и газовой динамики. Базой для изучения курса являются ранее изученные дисциплины такие, как «Теоретическая аэрогидромеханика-1», «Теоретическая аэрогидромеханика-2», математика (дифференциальное и интегральное исчисление, векторный и тензорный анализ). Он предшествует выполнению квалификационной работы магистранта по данной специализации, т.к. дает необходимые знания и навыки в рамках подготовки его квалификационной работы.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 3 семестр – экзамен

№	Вид деятельности	Семестр
		3
1	Лекции, ч	30
2	Практические занятия, ч	
3	Лабораторные занятия, ч	-
4	Занятия в контактной форме, ч из них	34
5	аудиторных занятий, ч	30
6	в электронной форме, ч	-
7	консультаций, час.	-
8	промежуточная аттестация, ч	2
9	Самостоятельная работа, час.	38
10	Всего, ч	72

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

Дисциплина «Современные проблемы теории устойчивости и турбулентности» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 2-м курсе магистратуры физического факультета НГУ в 3 семестре. Общая трудоёмкость дисциплины составляет 2 зачётные единицы, 72 академических часа.

Программа и основное содержание лекций (30 часов)

Раздел 1. Основы теории устойчивости, особенности развития возмущений (10 часов)

Введение. Основы теории устойчивости. Устойчивость движения во времени. Определения устойчивости. Критические числа Рейнольдса. До и надкритическая неустойчивости. Энергетический метод решения задачи устойчивости параллельных течений.

Линейная устойчивость течений в плоском канале и в пограничном слое. Неустойчивость движения жидкости между вращающимися цилиндрами. Достаточные условия неустойчивости. Неустойчивость Тейлора–Гертлера для течения в пограничном слое на вогнутой поверхности.

Теорема Сквайра. Временная и пространственная неустойчивость. Невязкая задача линейной устойчивости. Роль точки перегиба в профиле скорости. Необходимые условия неустойчивости. Область значений фазовых скоростей неустойчивых колебаний.

Особенности нелинейного развития возмущений. Теоретическое описание нелинейной стадии перехода. Трехволновый резонанс и параметрическая неустойчивость в погранслоиных течениях. Комбинационное взаимодействие волн. Амплитудные критерии начала нелинейной зоны перехода.

Раздел 2. Переход ламинарных течений в турбулентные состояния (10 часов)

Проблема восприимчивости. Распределенная и локализованная генерация волн неустойчивости. Генерация волн неустойчивости на локальных неоднородностях обтекаемой поверхности. Возбуждение волн неустойчивости локализованными в пространстве возмущениями потока. Восприимчивость трёхмерного пограничного слоя.

Экспериментальные исследования поздних стадий перехода. Сценарии перехода в двумерных течениях. Субгармонический переход. К-режим переходу. Комбинационные взаимодействия волн и перемежаемость. Развитие турбулентных пятен. Переход к турбулентности в течениях, модулированных продольными вихрями.

Восприимчивость пограничного слоя при повышенной степени турбулентности набегающего потока - история вопроса. Генерация возмущений из набегающего потока. Генерация возмущений на стенке модели. Механизмы перехода при повышенной степени турбулентности набегающего потока.

Методы управления ламинарно-турбулентным переходом. Изменение среднего течения. Профилирование и градиент давления. Влияние отсоса на устойчивость пограничного слоя. Влияние теплообмена со стенкой на устойчивость ламинарного течения. Риблеты. Взаимогашение волн неустойчивости. Микроэлектронно-механические системы.

Раздел 3. Основы теории турбулентности, моделирование течений газа (10 часов)

Уравнения Рейнольдса для осредненного потока. Локальная оценка турбулентного потока импульса. Турбулентные напряжения как функционал поля скорости. Двухпараметрическая теория турбулентности. Модели турбулентности для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений (метод RANS). Градиентная модель для турбулентных напряжений. Уравнение баланса турбулентной кинетической энергии. Механизм интенсификации завихренности в турбулентных течениях.

Структура развитой турбулентности. Спектральный трубопровод и каскадный перенос энергии турбулентности. Невязкая оценка диссипации кинетической энергии турбулентности. Колмогоровские масштабы турбулентности. Гипотезы подобия Колмогорова. Спектр трехмерной турбулентности.

Вейвлет-модель турбулентного вихря в волновом пространстве. Спектральный трубопровод равновесных и неравновесных турбулентных течений. Эффекты нелокальности. Уравнение переноса для спектрального расхода энергии турбулентности. Сжимаемая турбулентность. Дилатационная и безвихревая диссипация энергии турбулентности. Вихревые шоклеты.

Современные методы моделирования турбулентных течений. Прямое численное решение уравнений Навье–Стокса для турбулентного движения сплошной среды (DNS). «Фильтрация» турбулентности: метод моделирования турбулентности с выделением крупных вихрей (LES). Гибридные методы.

Самостоятельная работа студентов (38 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	20
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Курбацкий А. Ф. Лекции по турбулентности. Новосибирск: НГУ, 2000, Часть 1. Введение в турбулентность. (19 экз.)
2. Курбацкий А. Ф. Лекции по турбулентности. Новосибирск: НГУ, 2001, Часть 2. Моделирование турбулентных течений. (19 экз.)
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. (4 экз.)
4. Хинце И. О. Турбулентность. Ее механизм и теория / Пер. с англ. О. В. Яковлевского ; Под ред. Г. Н. Абрамовича. М.: Физматгиз, 1963. 680 с. : ил (5 экз.)
5. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965-1967, (в 2 ч.: 1 ч-4 экз.. 2 ч- 27 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. Курбацкий А. Ф. Лекции по турбулентности. Новосибирск: НГУ, 2000, Часть 1. Введение в турбулентность. 2001, Часть 2. Моделирование турбулентных течений.
2. Курбацкий А. Ф. Лекции по турбулентности. Учебное пособие. Второе издание, переработанное. Новосибирск: НГУ, 2015.
3. Линь Ц. Ц. Теория гидродинамической устойчивости. М.: Иностранная литература, 1958. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
4. Джозеф Д. Устойчивость течений жидкости. М.: Мир, 1981. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
5. Гапонов С. А., Маслов А. А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980.
6. Pope S.B. Turbulent Flows. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 770 p. <http://ns.itam.nsc.ru/lib/ecatalog/>
7. Смирнов Е. М., Гарбарук А. В. Конспект лекций дисциплины «Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений». С.-Петербург: СПбПУ, 2010. 127 с. (https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/doc/Lecture_turbulence_models.pdf)

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1. Современные профессиональные базы данных

1. <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/doku.php>
2. https://www.fdy.tu-darmstadt.de/fdyresearch/dns/direkte_numerische_simulation.en.jsp

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для реализации дисциплины «Современные проблемы теории устойчивости и турбулентности» используются помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории, действующими аэродинамическими трубами Т-327, Т-325, Т-324, Т-326, Т-313, АТ-303, ИТ-302, моделями летательных аппаратов и их элементов.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по

дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем контроля посещаемости и опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области теории устойчивости и турбулентности в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать основные принципы постановки теоретических и экспериментальных задач устойчивости ламинарных течений, ламинарно-турбулентного перехода и турбулентных течений; современные методы теоретических и экспериментальных исследований нестационарных течений газа; возможности современных вычислительных и экспериментальных средств исследования нестационарных течений.	Экзамен
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь создавать программы расчета устойчивости ламинарных течений, а также численного моделирования ламинарных и турбулентных течений; по поставленной задаче составить схему проведения эксперимента, выбрать соответствующую экспериментальную установку и методику измерения; оценить точность получаемого результата. Владеть современными теоретическими и экспериментальными методами исследования нестационарных газовых течений.	Экзамен

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Современные проблемы теории устойчивости и турбулентности».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы. При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить не принципиальные неточности.	<i>Отлично</i>
Экзамен: – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок, – наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.	<i>Хорошо</i>
Экзамен: – самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений, – корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками, – наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.	<i>Удовлетворительно</i>
Экзамен: – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	<i>Неудовлетворительно</i>

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Вопросы на экзамен

Тема №1 «Основы теории устойчивости, особенности развития возмущений»

1. Введение. Основы теории устойчивости. Устойчивость движения во времени. Определения устойчивости. Критические числа Рейнольдса.
2. Постановка линейных задач гидродинамической устойчивости. Особенности усиления в пространстве линейных волн. Линейная устойчивость течения в канале Уравнение Орра-Зоммерфельда.
3. Линейная устойчивость пограничного слоя на плоской пластине. Граничные условия и задача на собственные значения.
4. Связь между временной и пространственной неустойчивостями.
5. Неустойчивость движения жидкости между вращающимися цилиндрами. Достаточные условия неустойчивости. Неустойчивость Тейлора-Гертлера для течения в пограничном слое на вогнутой поверхности.
6. Невязкая задача линейной устойчивости. Роль точки перегиба в профиле скорости. Необходимые условия неустойчивости. Область значений фазовых скоростей неустойчивых колебаний.

Тема №2 «Переход ламинарных течений в турбулентные состояния»

7. Проблема восприимчивости. Распределенная и локализованная генерация волн неустойчивости.
8. Экспериментальные исследования поздних стадий перехода.
9. Сценарии перехода в двумерных течениях. Субгармонический и K -режим перехода.
10. Комбинационные взаимодействия волн и перемежаемость. Развитие турбулентных пятен. Переход к турбулентности в течениях, модулированных продольными вихрями.
11. Восприимчивость пограничного слоя при повышенной степени турбулентности набегающего потока - история вопроса. Генерация возмущений из набегающего потока.
12. Методы управления ламинарно-турбулентным переходом Изменение среднего течения. Профилирование и градиент давления. Влияние отсоса на устойчивость пограничного слоя. Влияние теплообмена со стенкой на устойчивость ламинарного течения.
13. Риблеты. Взаимодействие волн неустойчивости. Микро-электронно-механические системы.

Тема №3 «Основы теории турбулентности, моделирование течений газа»

14. Уравнения Рейнольдса для осредненного потока. Турбулентные напряжения как функционал поля скорости. Понятие о турбулентной вязкости
15. Особенности нелинейного развития возмущений. Комбинационное взаимодействие волн. Трехволновый резонанс и параметрическая неустойчивость в погранслойных течениях.
16. Современные методы моделирования турбулентных течений. Прямое численное решение уравнений Навье–Стокса для турбулентного движения сплошной среды. «Фильтрация» турбулентности: метод моделирования турбулентности с выделением крупных вихрей.
17. Двухпараметрическая теория турбулентности. Статистическая модель уравнений переноса компонент тензора турбулентных напряжений и вектора турбулентного потока скаляра.

Пример экзаменационного билета

1. Введение. Основы теории устойчивости. Устойчивость движения во времени. Определения устойчивости. Критические числа Рейнольдса.
2. Проблема восприимчивости. Распределенная и локализованная генерация волн неустойчивости.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.