

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Белорусского
государственного университета

А.Д.Король



Регистрационный № 2189/м.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Учебная программа учреждения образования по учебной дисциплине для
специальности:

7-06-0533-06 Механика и математическое моделирование

2024 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 7-06-0533-06-2023 и учебного плана № М54-5.4-44/уч. от 15.02.2023.

СОСТАВИТЕЛИ:

Конон Павел Николаевич, доцент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент;

Чорный Андрей Дмитриевич, доцент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

В.Л. Жданов, ведущий научный сотрудник Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, доктор технических наук;

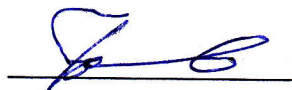
Ю.В. Жукова, ведущий научный сотрудник Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, кандидат физико-математических наук.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой теоретической и прикладной механики
механико-математического факультета БГУ
(протокол № 6 от 05.12.2024)

Научно-методическим советом БГУ
(протокол № 5 от 19.12.2024)

Заведующий кафедрой



М.А. Журавков

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели и задачи учебной дисциплины

Целью учебной дисциплины является получение магистрантами новых знаний по специальным разделам механики жидкости и газа – теории гидродинамической устойчивости и турбулентности с приобретением современных навыков математического и механического моделирования разнообразных физических явлений, аналитического и численного решения задач с возможностью их практического использования.

Задачи учебной дисциплины «Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность»:

- ознакомиться с основными задачами теории гидродинамической устойчивости и теории турбулентности;
- научиться моделировать задачи устойчивости и турбулентных течений;
- обучиться методам аналитического и численного исследования поставленных задач.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с углубленным высшим образованием (магистра).

Учебная дисциплина относится к модулю «Актуальные вопросы современной механики» государственного компонента.

Связи с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.

Учебная программа составлена с учетом межпредметных связей и программ по дисциплинам: «Уравнения математической физики», «Введение в механику сплошных сред», «Численные методы механики сплошных сред», «Механика жидкости и газа», «Теория гидродинамической устойчивости», «Основы теории турбулентного переноса».

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность» должно обеспечить формирование следующей **углубленной профессиональной компетенции:**

УПК. Находить, формулировать и решать актуальные проблемы гидроаэродинамики.

В результате изучения дисциплины «Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность» магистрант должен:

знать:

- общую постановку задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентности;
- методы решения линейных и нелинейных задач теории гидродинамической устойчивости;
- методы решения задач теории гидродинамической устойчивости с неизвестной областью течения;
- модели и методы исследования турбулентных течений.

уметь:

- применять полученные знания для исследования устойчивости реальных гидродинамических течений;
- решать классические и новые задачи устойчивости и турбулентности.

иметь навык:

- в методах исследования устойчивости гидродинамических течений в линейной и нелинейной постановке;
- в пользовании моделями и методах решения задач турбулентных течений.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается во 2 семестре. В соответствии с учебным планом всего на изучение учебной дисциплины «Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность» отведено для очной формы получения углубленного высшего образования – 216 часов, в том числе 88 аудиторных часов, лекции— 36 часов, лабораторные занятия – 52 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 6 зачетных единиц.

Форма промежуточной аттестации – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1 Постановка задачи теории гидродинамической устойчивости

Тема 1.1 Модели течений идеальной и вязкой жидкостей

Граничные условия. Точные решения задач основных задач гидродинамики. Понятия ламинарного и турбулентного течений.

Тема 1.2 Метод малых колебаний в задачах устойчивости течений

Основное течение. Уравнение Орра - Зоммерфельда. Задача на собственные значения. Теорема Сквайра.

Тема 1.3 Методы решения линейной задачи устойчивости

Прямой метод. Метод конечных разностей. Асимптотический метод.

Раздел 2 Невязкая неустойчивость

Тема 2.1 Неустойчивость открытых течений

Уравнение и теоремы Релея.

Тема 2.2 Метод Релея

Исследования неустойчивости в слое смешения, струйного течения, в следе за обтекаемым телом.

Раздел 3 Течения со свободной поверхностью и поверхностью раздела

Тема 3.1 Неустойчивость в течениях с поверхностью раздела двух сред

Граничные условия на поверхности раздела. Случай двух идеальных жидкостей. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Неустойчивость Релея-Тейлора.

Тема 3.2 Течение с градиентом средней скорости

Исследования установившегося течения под действием касательной силы. Устойчивость течения под действием касательной силы.

Тема 3.3 Волны в слое жидкости на наклонной поверхности

Стационарное решение. Движение и нелинейное развитие волн под действием силы тяжести в слое на наклонной поверхности. Метод и уравнения Капицы-Шкадова.

Раздел 4 Устойчивость и распад капиллярных струй

Тема 4.1 Постановка задачи о течении капиллярных струй

Приближение типа пограничного слоя. Метод коллокаций. Стационарное течение.

Тема 4.2 Исследование устойчивости в случае потенциального течения в струе

Устойчивость с учетом внешнего воздействия в линейном приближении. Устойчивость свободной струи. Решение Релея. Экспериментальные исследования.

Тема 4.3 Связь пространственно-и временно растущих возмущений

Исследование устойчивости в линейном приближении при неизменном давлении в поперечном сечении струи.

Тема 4.4 Нелинейное развитие возмущений в струе

Развитие возмущений с учетом переменного внешнего давления. Распад струи на капли разного размера. Область практического применения течений.

Раздел 5 Движение слоев и пленок в центробежном поле сил

Тема 5.1 Устойчивость течения жидкости между вращающимися цилиндрами

Стационарное течение. Образование вихрей Тейлора.

Тема 5.2 Движение, устойчивость и распад слоев вязких жидкостей на внешней поверхности горизонтального вращающегося цилиндра

Экспериментальные исследования распада слоя на внешней поверхности закрученного цилиндра. Формы равновесия осесимметричных и плоских слоев. Изолированные слои. Первые интегралы. Бифуркации равновесных слоев. Исследование устойчивости плоского и осесимметричного слоев на внешней поверхности закрученного цилиндра в невязком приближении. Возмущенное движение слоя. Уравнения Моффата-Пухначева. Метод Капицы-Шкадова в движениях слоев в поле центробежных сил. Вывод и исследование уравнений эволюции поверхности. Неизотермическая задача. Область практического применения течений.

Тема 5.3 Движение и устойчивость слоев вязких жидкостей на внутренней поверхности вращающегося цилиндра

Экспериментальные исследования. Формы равновесия осесимметричных и плоских слоев, ветвление решений. Исследование устойчивости слоев на внутренней поверхности цилиндра в невязком приближении. Теоретические исследования движения плоских и осесимметричных слоев. Вывод уравнений эволюции поверхности. Численное решение уравнений эволюции и результаты. Неизотермическая задача. Область практического применения течений.

Тема 5.4 Формы равновесия, устойчивость и распад изолированного слоя вязкой жидкости на вращающемся диске

Экспериментальные и теоретические исследования движения слоев по поверхности вращающегося диска. Формы равновесия осесимметричных односвязных и двусвязных капель на поверхности вращающегося диска. Устойчивость изолированных капель.

Тема 5.5 Движение сплошных слоев и пленок на вращающемся диске

Уравнения эволюции поверхности сплошного слоя. Численное решение уравнений эволюции и результаты. Возможность образования гидравлического прыжка. Область практического применения течений.

Раздел 6 Основные сведения о турбулентных течениях

Тема 6.1 Молекулярный и турбулентный перенос

Ламинарное течение. Неустойчивость ламинарного течения. Качественные сценарии перехода к турбулентной форме движения. Признаки турбулентных течений. Уравнения Навье-Стокса. Законы гидромеханического подобия, критерии подобия, число Рейнольдса. Критическое число Рейнольдса.

Тема 6.2 Вероятностное описание турбулентного переноса

Методы осреднения случайных полей. Функции плотности распределения вероятности, осредненные и пульсационные характеристики случайных гидродинамических величин. Уравнения Рейнольдса. Тензор турбулентных напряжений. Теорема эргодичности.

Тема 6.3 Теория однородной и изотропной турбулентности

Однородная, изотропная турбулентность. Определение спектра турбулентных пульсаций. Оценка масштабов турбулентности. Интервалы масштабов турбулентности. Гипотезы подобия А.Н. Колмогорова и их следствия. Закон пяти третей. Каскадный процесс переноса энергии Ричардсона.

Раздел 7 Проблема замыкания уравнений турбулентности

Тема 7.1 Замыкание уравнений Рейнольдса

Стратегия замыкания высших статистических моментов случайных гидродинамических величин. Турбулентный пограничный слой и его уравнения. Полуэмпирические теории турбулентности. Приближение Буссинеска. Модели Прандтля и Кармана. Течение около стенки. Логарифмический профиль скорости.

Тема 7.2 Кинетическая энергия турбулентности. Турбулентный перенос скаляра

Определение кинетической энергии турбулентности. Уравнение баланса турбулентной энергии. Скорость диссипации турбулентной энергии. Коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности. Формула Колмогорова-Прандтля. Связь между переносом тепла (массы) и переносом импульса. Модель турбулентного переноса скаляра.

Раздел 8 Аналитические и численные методы моделирования турбулентных течений

Тема 8.1 Аналитические методы моделирования турбулентных течений

Прямое численное моделирование. Метод крупных вихрей. Метод статистических моментов. Метод функции плотности распределения вероятности случайных величин.

Тема 8.2 Дифференциальные модели замыкания уравнений Рейнольдса

Модели турбулентности первого порядка (алгебраические). Модели второго порядка. Замыкание уравнений кинетической энергии турбулентных пульсаций и ее изотропной диссипации. k - ϵ , k - ω модели, SST модель сдвиговых напряжений.

Тема 8.3 Моделирование крупных вихрей

Фильтрованные уравнения Навье-Стокса и подсеточные напряжения. Модель Смагоринского. Динамическая модель Германо.

Тема 8.4 Численные методы моделирования турбулентного переноса массы, импульса и энергии

Спектральный метод, метод конечных объемов, метод крупных частиц. Метод конечных объемов для решения гидродинамических задач. SIMPLE алгоритм. Метод конечных объемов для решения задач конвективного теплопереноса в турбулентных потоках. Аппроксимация граничных условий.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Очная (дневная) форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Постановка задачи теории гидродинамической устойчивости							
1.1	Модели течений идеальной и вязкой жидкостей	2						
1.2	Метод малых колебаний в задачах устойчивости течений				2			решение задач
1.3	Методы решения линейной задачи устойчивости				2			решение задач
2	Невязкая неустойчивость							
2.1	Неустойчивость открытых течений	2						
2.2	Метод Релея				2			решение задач
3	Течения со свободной поверхностью и поверхностью раздела							
3.1	Неустойчивость в течениях с поверхностью раздела двух сред	2			2			отчет по лабораторной работе

3.2	Течение с градиентом средней скорости				2			решение задач
3.3	Волны в слое жидкости на наклонной поверхности	2			2			реферат
4	Устойчивость и распад капиллярных струй							
4.1	Постановка задачи о течении капиллярных струй.	2			2			решение задач
4.2	Исследование устойчивости в случае потенциального течения в струе				2			отчет по лабораторной работе
4.3	Связь пространственно-и временно растущих возмущений				2			решение задач
4.4	Нелинейное развитие возмущений в струе	2			2			реферат
5	Движение слоев и пленок в центробежном поле сил							
5.1	Устойчивость течения жидкости между вращающимися цилиндрами	2			2			решение задач
5.2	Движение, устойчивость и распад слоев вязких жидкостей на внешней поверхности горизонтального вращающегося цилиндра	2			2			решение задач
5.3	Движение и устойчивость слоев вязких жидкостей на внутренней поверхности вращающегося цилиндра				2			отчет по лабораторной работе
5.4	Формы равновесия, устойчивость и распад слоя вязкой жидкости на вращающемся диске	2						
5.5	Движение сплошных слоев и пленок на вращающемся диске.	2			2			реферат

6	Основные сведения о турбулентных течениях						
6.1	Молекулярный и турбулентный перенос	2			2		решение задач
6.2	Вероятностное описание турбулентного переноса	2			2		решение задач
6.3	Теория однородной и изотропной турбулентности	2			2		реферат
7	Проблема замыкания уравнений турбулентности						
7.1	Замыкание уравнений Рейнольдса	2			2		решение задач
7.2	Кинетическая энергия турбулентности. Турбулентный перенос скаляра	2			4		отчет по лабораторной работе
8	Аналитические и численные методы моделирования турбулентных течений						
8.1	Аналитические методы моделирования турбулентных течений	2			4		реферат
8.2	Дифференциальные модели замыкания уравнений Рейнольдса	2			2		решение задач
8.3	Моделирование крупных вихрей	2			2		отчет по лабораторной работе
8.4	Численные методы моделирования турбулентного переноса массы, импульса и энергии				4		реферат
ВСЕГО ЧАСОВ		36			52		

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основная литература

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учебное пособие для студентов физических специальностей университетов : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц; под ред. Л. П. Питаевского. - Изд. 6-е, испр. - Москва: Физматлит, 2021.–Т. 6 : Гидродинамика. - 2021. - 727 с. - URL: <https://znanium.com/catalog/document?id=369178>.
2. Александров, Д. В. Прикладная гидродинамика: учебное пособие для вузов / Д. В. Александров, А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Исакова. - Москва: Издательство Юрайт, 2024. - 109 с.
3. Швед, Г. М. Введение в динамику и энергетику атмосферы: учебное пособие / Г. М. Швед ; Санкт-Петербургский гос. ун-т. - Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2020. - 394 с. - URL: <https://znanium.com/catalog/document?id=373760>.

Дополнительная литература

1. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. II. М.: Физматгиз, 1963.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5. М.: Наука, 1978.
3. Шкадов В.Я. Некоторые методы и задачи теории гидродинамической устойчивости. - Изд. МГУ, Научные труды № 25, 1973.
4. Мазо А.Б. Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости. Учебное пособие. - Казань: КГУ. 2007
5. Фриш У. Турбулентность. Наследие А.Н. Колмогорова. М.: Фазис. 1998.
6. Седов Л.И. Механика сплошных сред. Т. 1, т. 2, изд. 5. М.: Наука, 1994.
7. Шлихтинг. Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
9. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988.
10. Себиси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. М.: Мир. 1987.
11. Шкадов В.Я., Запryanов З.Д. Течения вязкой жидкости. Изд. МГУ, 1984.
12. Дразин Ф. Введение в теорию гидродинамической устойчивости. М.: Физматлит, 2005.
13. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М., Наука, 1972.
14. Бетчов Р., Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости. М., Мир, 1971.
15. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир. 1986.
16. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003.

17. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. М.: Мир. 1988.
18. Линь Цзя-Цзяо. Теория гидродинамической устойчивости. М: ИЛ, 1958.
19. Гайфуллин А.М. Вихревые течения. М.: Наука, 2015.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой отметки

Объектом диагностики компетенций магистрантов являются знания, умения, полученные ими в результате изучения учебной дисциплины. Выявление учебных достижений магистрантов осуществляется с помощью мероприятий текущего контроля и промежуточной аттестации.

Для диагностики компетенций могут использоваться следующие средства текущего контроля: отчет по лабораторной работе, реферат, решения задач.

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность» учебным планом предусмотрен **экзамен**.

Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины.

Для магистрантов, пропустивших контрольные мероприятия или получивших неудовлетворительную отметку, решение о повторном проведении контрольного мероприятия выносится в соответствии с Положением о рейтинговой системе оценки знаний обучающихся по учебной дисциплине в Белорусском государственном университете.

Для формирования итоговой отметки по учебной дисциплине используется модульно-рейтинговая система оценки знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения. Рейтинговая система предусматривает использование весовых коэффициентов для текущей и промежуточной аттестации студентов по учебной дисциплине.

Формирование итоговой отметки в ходе проведения контрольных мероприятий текущей аттестации (примерные весовые коэффициенты, определяющие вклад текущей аттестации в отметку при прохождении промежуточной аттестации):

- решения задач – 30 %;
- написание реферата – 30 %;
- оформление отчёта – 40 %.

Итоговая отметка по дисциплине рассчитывается на основе итоговой отметки текущей аттестации (рейтинговой системы оценки знаний) 40 % и экзаменационной отметки 60 %.

Примерная тематика лабораторных занятий

Лабораторная работа № 1. Исследование устойчивости струйного профиля методом Релея.

Лабораторная работа № 2. Исследование устойчивости профиля слоя смешения двух потоков методом Релея.

Лабораторная работа № 3. Неустойчивость течения с поверхностью раздела двух невязких неограниченных жидкостей.

Лабораторная работа № 4. Неустойчивость течения с поверхностью раздела двух невязких ограниченных жидкостей.

Лабораторная работа № 5. Неустойчивость круговой струи невязкой жидкости при потенциальном течении в линейном приближении.

Лабораторная работа № 6. Исследование форм свободной поверхности слоя, неподвижного относительно вращающегося цилиндра, для плоского и осесимметричного случаев с помощью первого интеграла.

Лабораторная работа № 7. Исследование устойчивости плоского и осесимметричного слоев жидкости на внешней поверхности вращающегося цилиндра в невязкой постановке.

Лабораторная работа № 8. Исследование универсального профиля скорости в вязком подслое, турбулентном пограничном слое и слое следа.

Лабораторная работа № 9. Изучение профиля скорости при турбулентном движении среды в трубах.

Лабораторная работа № 10. Исследование профиля скорости при турбулентном движении среды в струйных потоках.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется **практико-ориентированный подход**, который предполагает:

- освоение содержания образования через решения практических задач;
- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- ориентацию на генерирование идей, реализацию групповых студенческих проектов, развитие предпринимательской культуры;
- использованию процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

При изучении учебной дисциплины следующие формы самостоятельной работы:

- поиск (и обзор литературы и электронных источников по индивидуально заданной проблеме дисциплины;
- изучение материала, вынесенного на самостоятельную проработку;
- подготовка к лекциям и лабораторным занятиям;

– работы, предусматривающие подготовку отчетов по лабораторным работам с устной защитой.

Тем самым, имеется в виду постепенное превращение обучения в самообучение, когда магистрант должен получать знания главным образом за счет креативной самостоятельной работы, самостоятельно осуществляя поиск необходимой информации и созидательно прорабатывая ее с тем, чтобы выполнить необходимые умозаключения и получить результаты.

В этом случае, выполняя учебные задачи, магистранты самостоятельно приобретают новые знания, навыки и умения, в частности, умение анализировать и принимать решения в нестандартных ситуациях, что очень важно для эффективной будущей самостоятельной профессиональной деятельности.

Темы реферативных работ

1. Исследования неустойчивость течений в следах и струях методом Релея.
2. Исследования неустойчивости в течениях с поверхностью раздела.
3. Слой жидкости на наклонной поверхности и его устойчивость.
4. Неустойчивость и распад капиллярных струй.
5. Исследование форм равновесия слоя жидкости на внешней поверхности вращающегося цилиндра.
6. Бифуркация квазистационарных решений движения слоя жидкости на внешней поверхности вращающегося цилиндра.
7. Исследование устойчивости плоского слоя на внешней поверхности закрученного цилиндра в невязком приближении.
8. Экспериментальные и теоретические исследования распада слоя на внешней поверхности вращающегося цилиндра.
9. Теория однородной и изотропной турбулентности. Гипотезы подобия А.Н. Колмогорова и их следствия.
10. Проблема замыкания турбулентности. Турбулентный пограничный слой и его уравнения.
11. Методы математического моделирования турбулентных течений.
12. Модели замыкания уравнений Рейнольдса.
13. Моделирование крупных вихрей.
14. Численные методы моделирования турбулентного переноса массы, импульса и энергии: спектральный метод, метод конечных объемов, метод крупных частиц.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Основные уравнения и постановка задачи об устойчивости стационарных течений. Метод малых колебаний.
2. Уравнение Орра-Зоммерфельда. Задача на собственные значения. Теорема Сквайра.

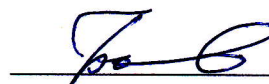
3. Неустойчивость течений в следах и струях. Невязкая неустойчивость. Уравнение Релея.
4. Метод Релея исследования невязкой неустойчивости. Примеры.
5. Неустойчивость в течениях с поверхностью раздела. Неустойчивость Тейлора-Лапласа. Неустойчивость Гельмгольца.
6. Течение под действием касательного напряжения, его устойчивость.
7. Слой жидкости на наклонной поверхности и его устойчивость. Метод Капицы-Шкадова.
8. Неустойчивость и распад капиллярных струй. Стационарное решение. Исследование устойчивости в линейном приближении при потенциальном течении.
9. Неустойчивость и распад капиллярных струй. Исследование устойчивости в линейном приближении при постоянстве давления в сечении.
10. Нелинейная неустойчивость. Нелинейное развитие возмущений в струе идеальной жидкости.
11. Движение слоя жидкости на внешней поверхности вращающегося цилиндра. Исследование форм относительного равновесия. Первые интегралы в осесимметричном и плоском случаях.
12. Движение слоя жидкости на внешней поверхности вращающегося цилиндра. Исследование форм равновесия в естественных координатах.
13. Движение слоя жидкости на внешней поверхности вращающегося цилиндра. Ветвление квазистационарных решений в линейном приближении.
14. Движение слоя жидкости на внешней поверхности вращающегося цилиндра. Бифуркация квазистационарных решений в нелинейной задаче.
15. Исследование устойчивости плоского слоя на внешней поверхности закрученного цилиндра в невязком приближении.
16. Экспериментальные и теоретические исследования распада слоя на внешней поверхности вращающегося цилиндра. Приближение Стокса. Уравнения Моффата-Пухначева.
17. Теоретические исследования распада слоя на внешней поверхности вращающегося цилиндра. Вывод уравнения эволюции поверхности. Численное решение уравнений эволюции и результаты.
18. Понятие о турбулентных течениях. Качественные сценарии перехода к турбулентной форме движения. Признаки турбулентных течений.
19. Вероятностное описание турбулентного переноса. Уравнения Рейнольдса. Тензор турбулентных напряжений. Теорема эргодичности.
20. Теория однородной и изотропной турбулентности. Гипотезы подобия А.Н. Колмогорова и их следствия.
21. Проблема замыкания турбулентности. Турбулентный пограничный слой и его уравнения. Полуэмпирические теории турбулентности. Приближение Буссинеска. Модели Прандтля и Кармана.
22. Кинетическая энергия турбулентности. Турбулентный перенос скаляр.
23. Методы математического моделирования турбулентных течений.
24. Дифференциальные модели замыкания уравнений Рейнольдса.

25. Моделирование крупных вихрей.
26. Численные методы моделирования турбулентного переноса массы, импульса и энергии: спектральный метод, метод конечных объемов, метод крупных частиц.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Учебная дисциплина не требует согласования			

Заведующий кафедрой теоретической и
прикладной механики
доктор ф/м наук профессор



М.А.Журавков

05.12.2024 г.

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на ____ / ____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
_____ (протокол № ____ от _____ 202__ г.)

Заведующий кафедрой

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета
