

Разработано и утверждено
Ученым советом - ИЭПТ
структурного подразделения
ФИЦ КазНЦ РАН
30 января 2025 г., протокол № 1

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Турбулентные течения»

Составная часть
**ОСНОВНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ -
программы подготовки научных и научно-педагогических кадров
в аспирантуре**

Научная специальность

Механика жидкости, газа, и плазмы

СОДЕРЖАНИЕ

1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения, трудоемкость дисциплины.
2. Перечень планируемых результатов обучения.
3. Место дисциплины в структуре образовательной программы.
4. Учебно-тематический план занятий
5. Формы текущего контроля и промежуточной аттестации, критерии оценки.
6. Перечень учебной литературы и ресурсов сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины.
7. Описание материально-технической базы, необходимой для освоения дисциплины.

1. ВИДЫ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, СПОСОБ И ФОРМЫ ЕЕ ПРОВЕДЕНИЯ, ТРУДОЕМКОСТЬ ДИСЦИПЛИНЫ

Виды учебной деятельности: аудиторные занятия – 27 часов, самостоятельная работа – 92 часа, зачет - 1 час, всего 120 часов.

Форма проведения аудиторных занятий – лекции, семинары, консультации.

В рамках часов самостоятельной работы по указанию преподавателя аспиранты прорабатывают темы и осваивают теоретические вопросы, излагаемые в лекционном курсе, а также самостоятельно изучают другие вопросы программы.

Формой итогового контроля является зачет.

2. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

В результате освоения дисциплины аспирант должен получить дополнительные знания, умения и навыки. Аспирант должен:

Знать:

- современные проблемы и методологию теоретических и экспериментальных работ в области профессиональной деятельности;
- основные положения теории турбулентных течений;
- общие закономерности и индивидуальные особенности изучаемого многообразия типов турбулентных течений, основные закономерности взаимосвязи параметров для каждого типа турбулентных течений;
- современные методы экспериментального исследования турбулентных течений и принципы действия используемого для этих целей измерительного оборудования

Владеть:

- методами описания процессов переноса в турбулентных течениях;
- опытом работы с современным экспериментальным оборудованием для проведения измерения локальных и распределенных характеристик турбулентных течений;
- методикой сбора и статистической обработки полученной экспериментальной информации;

Уметь:

- ставить цели экспериментальных или теоретических исследований

сложных турбулентных течений;

- определять наиболее рациональные подходы к изучению турбулентных течений;
- планировать проведение научных исследований;
- при выполнении экспериментов выбирать наиболее приемлемые средства измерений и соответствующее измерительное оборудование;
- определять метрологические характеристики разработанных систем с учетом характера реализуемых ими измерений.
- использовать фундаментальные основы теории турбулентных течений при исследованиях по теме выпускной работы.

3. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина «Турбулентные течения» является дисциплиной по выбору и включена в Блок «Образовательная компонента» основных профессиональных образовательных программ высшего образования – программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Обучение планируется на втором и/или третьем курсе (определяется индивидуальным учебным планом аспиранта).

Данная дисциплина базируется на знаниях и умениях, выработанных при прохождении общих профессиональных курсов теоретической механики, механики сплошных сред, математической физики в рамках магистерской программы образования или специалитета. Владением данными знаниями и умениями устанавливается в ходе вступительных испытаний в аспирантуру.

Аспирант должен обладать навыками самостоятельного освоения изучаемого материала.

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Подходы к математическому описанию движения жидкости и газа. Уровни описания движения жидкости и газа. Критерий Кнудсена. Разделение уровней на молекулярный, больцмановский и гидродинамический уровень в зависимости от числа Кнудсена и числа Рейнольдса. Описание каждого уровня. Особенности гидродинамического уровня. Дифференциальные уравнения движения идеальной и вязкой несжимаемой жидкости. Уравнения пограничного слоя. Основные положения вывода уравнений Эйлера. Сокращенный вывод уравнений Навье-Стокса. Тензор напряжений Рейнольдса. Уравнение энергии. Краевые условия. Уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости и для случая отсутствия теплообмена. Случаи точных решений уравнений Навье-Стокса.

Опыты Рейнольдса. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Проблемы устойчивости течения. Развитие возмущений и переход к турбулентности. Основные стадии перехода при течении вдоль гладкой поверхности. Современные представления. Признаки ламинарно-турбулентного перехода. Ламинарно-турбулентный переход в отрывных течениях. Новые экспериментальные данные.

Подходы к численному моделированию турбулентных течений. Метод DNS, особенности, диапазоны применения и перспективы практического использования. Осреднение по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Тензор Рейнольдсовых напряжений. Гипотеза Буссинеска. Длина пути смешения. Алгебраические модели турбулентности. Модель Ван-Дриста-Клаузера. Дифференциальные модели: модель с одним уравнением, k - ϵ и k - ω модели. Модель переноса Рейнольдсовых напряжений.

Отрыв потока: определение, необходимые условия. Классические представления о развитии отрыва потока. Современные представления: опыты Симпсона, вероятность обратного течения, эксперименты Козлова, Михеева. Отрыв потока вследствие излома поверхности. Области течения и современные представления о характеристиках отрывных течений. Поперечное обтекание цилиндра. Дорожка Кармана. Влияние внешней турбулентности и степени загромождения потока цилиндром на распределение давления и теплоотдачу поперечного цилиндра.

Внутренние отрывные течения. Течения в диффузорах. Особенности отрыва потока в диффузорных каналах. Типы диффузоров. Предотрывное состояние пограничного слоя, предотрывные диффузоры. Асимметричные диффузоры.

Основные сведения из теории турбулентных струй. Затопленные струи. Расширение в затопленной струе. Начальный участок и участок стабилизированного течения. Изменение скорости вдоль оси затопленной струи. Турбулентная струя в спутном и встречном потоке. Основы теории струи в поперечном потоке. Импактные струи.

Результаты исследования ламинарных струйных течений. Ламинарные плоские и осесимметричные струи. Ламинарно-турбулентный переход в струйных течениях: развитие представлений и новые экспериментальные данные. Ламинарные струи в условиях внешних воздействий.

Основные сведения из теории нестационарных течений. Периодическая и аperiodическая нестационарность. Уравнение Бернулли для нестационарного случая. Инерционный напор. Параметры и критерии подобия, используемые для описания нестационарных течений. Пульсирующие и осциллирующие потоки. Сведения из истории исследований пульсирующих течений. Пульсирующие течения в трубах. Влияние периодической нестационарности на турбулентное течение в каналах. Перепад давления и гидродинамическое сопротивление. Резонансные явления. Классификация пульсирующих потоков в каналах. Влияние пульсаций потока на теплоотдачу в гладкой трубе. Влияние пульсаций на гидродинамику и теплообмен отрывных течений. Турбулентный отрыв потока в условиях гидродинамической нестационарности. Разгонный вихрь и его роль в интенсификации процессов

переноса. Классификация турбулентных отрывных течений в условиях гидродинамической нестационарности. Пульсирующие потоки в дискретно шероховатых каналах: гидродинамические и тепловые процессы. Новые экспериментальные данные о нестационарных отрывных течениях.

Современные экспериментальные методы исследования турбулентных течений. Контактные методы. Основы пневмометрических методов измерения параметров газовых потоков. Трубка Пито и Пито-Прандтля. Измерение поверхностного трения пневмометрическими методами: трубка Престона. Основы термоанемометрических методов измерения локальных параметров потока. Термоанемометр постоянной температуры и постоянного тока. Ниточные и пленочные датчики. Градуировочная зависимость. Основы методики выполнения измерений. Термоанемометрические измерения вектора и продольной компоненты вектора поверхностного трения в отрывных течениях.

Бесконтактные оптические методы. Метод LDA: основные закономерности и методика выполнения измерений. Возможности метода. Метод PIV: область применения и возможности. Оборудование и его характеристики. Получение мгновенных векторных полей скорости и завихренности потока. Расчет статистических характеристик. Метод SIV. Особенности и области применения. Требования к аппаратуре и методика обработки результатов.

5. УЧЕБНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ЗАНЯТИЙ

№ п/п	Наименование темы	Аудиторные занятия	Самост. работа	Всего часов
1	Подходы к математическому описанию движения жидкости и газа.	3	10	13
2	Дифференциальные уравнения движения идеальной и вязкой несжимаемой жидкости. Уравнения пограничного слоя	4	12	16
3	Проблемы численного моделирования турбулентных течений	3	12	15
4	Турбулентные отрывные течения	4	12	16
5	Внутренние отрывные течения. Течения в диффузорах	3	12	15
6	Турбулентные и ламинарные струйные течения	3	10	13

7	Нестационарные турбулентные течения	3	12	15
8	Современные экспериментальные методы исследования турбулентных течений	4	12	16
9	Зачет	1		1
ИТОГО		28	92	120

6. ФОРМЫ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ, КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

6.1. Текущий контроль: текущий контроль освоения дисциплины проводится регулярно, начиная со второй недели обучения, в форме контроля посещаемости, устного опроса по изучаемой теме. Формой итогового контроля по дисциплине является зачет.

Вопросы к зачету

1. Молекулярный, больцмановский и газодинамический уровни описания движения газа. Число Кнудсена.
2. Структура турбулентного пограничного слоя. Вязкий подслой и «закон стенки».
3. Уравнение Навье-Стокса. Закон трения Стокса.
4. Подходы к описанию движений жидкости: метод Эйлера и Лагранжа.
5. Отрыв потока. Типы отрывных течений и условия возникновения отрыва. Современные подходы к описанию турбулентных отрывных течений. Вероятность обратного течения и вектор трения
6. Уравнение движения идеальной жидкости.
7. Режимы течения жидкости. Основные стадии ламинарно-турбулентного перехода на плоской пластине. Признаки ламинарно-турбулентного перехода.
8. Понятие пограничного слоя. Получение уравнений пограничного слоя из уравнений Навье-Стокса для двумерного нестационарного течения несжимаемой жидкости
9. Поперечное обтекание цилиндра. Влияние степени турбулентности и загромождения цилиндром потока
10. Течения в диффузорах. Типы диффузоров и потери давления
11. Ламинарно-турбулентный переход в отрывных течениях. Современные представления.

12. Течение за плохообтекаемыми телами. Дорожка Кармана. Кризис сопротивления цилиндра.

13. Моделирование турбулентности. Гипотеза Буссинеска. Теория пути перемешивания Прандтля. Алгебраическая и дифференциальные модели турбулентности.

14. Развитие представлений об отрыве потока. Классическая теория

15. Подходы к решению уравнений Навье-Стокса. Методы RANS, URANS, LES и DNS.

16. Нестационарные турбулентные течения. Классификация. Современные представления о процессах переноса в пульсирующих потоках

17. Основы теории турбулентных струйных течений. Затопленные струи

6.2. Критерии оценки:

Оценка	Требования к знаниям и критерии выставления оценок:
зачтено	Аспирант при ответе демонстрирует знание тем учебной дисциплины, владеет основными понятиями и терминами, знает особенности развития соответствующей области науки, имеет представление о специфике объектов исследований. Информирован о современных направлениях работ, ознакомлен с содержанием основных литературных источников, способен сделать анализ проблем и наметить пути их решения.
Не зачтено	Аспирант демонстрирует плохое знание большей части основного материала в соответствующей области науки. Не информирован или слабо разбирается в проблемах, и не в состоянии наметить пути их решения.

При отсутствии оценки «зачтено» обучающийся не допускается к промежуточной аттестации

7. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

1. Юн А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2009. – 272 с..

2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: т.IV. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988, 736 с..

3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. – Ч.1 М.: Наука. 1991. 600 с., Ч.2. – 304 с.
4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: ЭКОЛИТ. 2011. – 700 с.
5. Виноградов Б.С. Прикладная газовая динамика: уч. пособие. М.: ЭКОЛИТ. 2011. – 256 с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Изд-во Наука. 1974 г. 711 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1987. 840 с.
8. А.В.Бойко, Г.Р.Грек, А.В.Довгаль, В.В.Козлов. Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН. 1999. – 328 с.
9. Гарбарук А.В. Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2016. 234 с.
10. А.С.Гиневский, Е.В.Власов, Р.К.Каравосов Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит. 2001. 240 с.
11. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003. – 292 с.
12. Репик Е.У., Соседко Ю.П. Турбулентный пограничный слой. Методы и результаты экспериментальных исследований. – М.: Физматлит. 2007. 312 с.
13. Занин Б.Ю., Козлов В.В.. Вихревые структуры в дозвуковых отрывных течениях: Учеб. пособие. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т. – 2011. 116 с.
14. Головкин М.А., Головкин В.А., Калявкин В.М. Вопросы вихревой гидродинамики. М. Физматлит. 2009. – 264 с.
15. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2016. 643 с.

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Лекционные занятия и консультации, самостоятельная работа по освоению дисциплины и подготовка к сдаче кандидатских экзаменов проводятся в специальных помещениях (читальный зал научной библиотеки и/или конференц-залы), оборудованных мебелью (столы, стулья), классной доской (меловой), компьютером, проектором для демонстрации презентаций.

Практические занятия проводятся на экспериментальной базе лаборатории гидродинамики и теплообмена ИЭПТ и базе ООО НПП ИРВИС. В распоряжении преподавателя и аспирантов учебно-научная лаборатория, оснащенная следующим комплектами термоанемометрической аппаратуры DISA 55M (4 комплекта) и ИРВИС ТА5.2 (2 комплекта) с набором нитяных термоанемометрических датчиков, аэродинамическая труба со сменными рабочими участками и устройством создания пульсаций потока, установка для

градуировки термоанемометрических датчиков на базе камеры Эйфеля, система измерений мгновенных векторных полей скорости SIV в комплекте с генератором аэрозолей Safex, скоростная видеокамера Fastec HiSpec с объективом Navitar.

Учебно-научная лаборатория, оснащенная оборудованием для градуировки и поверки расходомеров-счетчиков газа и проведения научных исследований. В состав оборудования входит Установка поверочная газодинамическая УПГ-10 с набором рабочих участков, система подачи воздуха высокого давления и устройство для создания пульсаций потока.

Мультимедийное оборудование.

Разработчик: ведущий научный сотрудник лаборатории гидродинамики и теплообмена ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН, доктор технических наук Молочников В.М.

Ведущий научный сотрудник лаборатории
гидродинамики и теплообмена, доктор
технических наук

В.М. Молочников