

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования



**Пермский национальный исследовательский
политехнический университет**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе


_____ Н.В.Лобов

« 21 » февраля 20 22 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина: _____ **Механика жидкости и газа**
(наименование)

Форма обучения: _____ **очная**
(очная/очно-заочная/заочная)

Уровень высшего образования: _____ **специалитет**
(бакалавриат/специалитет/магистратура)

Общая трудоёмкость: _____ **360 (10)**
(часы (ЗЕ))

Направление подготовки: _____ **24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей**
(код и наименование направления)

Направленность: _____ **Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок (СУОС)**
(наименование образовательной программы)

1. Общие положения

1.1. Цели и задачи дисциплины

Целью учебной дисциплины является формирование комплекса знаний об основных законах движения жидкости и газа при различных скоростях течения и внешних воздействиях, общетеоретического кругозора, необходимых для приобретения умений и навыков анализа гидрогазодинамических явлений, их моделирования и расчёта.

К задачам учебной дисциплины относятся:

- формирование знаний
 - основных законов сохранения и закономерностей, описывающих до- и сверхзвуковые течения с учётом вязкости и сжимаемости;
 - видов математических моделей;
 - физических и математических моделей течений невязких и вязких течений несжимаемых и сжимаемых сред;
 - правил постановки, решения и оформления результатов, как основных этапов решения задач о течениях жидкости и газа;
 - основных методов и средств измерения локальных и интегральных параметров потоков на разных скоростях течения;
 - характеристик измерительных устройств и датчиков и способов их теоретического и экспериментального определения;
- формирование умений
 - пользоваться приёмами постановки и решения частных задач механики жидкости и газа с помощью аналитических методов и современных вычислительных пакетов;
 - выявлять и анализировать физическую сущность процессов и явлений в течениях жидкости и газа;
 - формулировать, обосновывать и описывать физические и математические модели течений жидкости и газа;
 - выполнять гидрогазодинамические расчёты элементов двигателей и газодинамических явлений по моделям несжимаемых и сжимаемых течений;
 - анализировать результаты решений гидрогазодинамических задач и оценивать методы их решения;
 - разрабатывать и описывать схемы препарирования объектов газодинамического экспериментального исследования;
 - применять методы регистрации и обработки результатов научно-технических экспериментов и испытаний для разработки методик первичной и вторичной обработки результатов измерений;
- формирование навыков
 - построения физических и математических моделей стационарных и не-стационарных течений жидкости и газа в расчётно-теоретических задачах в области авиадвигателестроения, анализа и обобщения результатов моделирования;
 - применения приёмов и опыта постановки и решения прикладных инженерных задач в области механики жидкости и газа;
 - решения общих гидрогазодинамических задач с применением современных прикладных программных средств;
 - анализа и оценки физических и математических моделей, применённых для решений гидрогазодинамических задач, результатов их решения;
 - планирования и проведения газодинамических экспериментальных исследований;
 - обработки и анализа результатов экспериментальных исследований.

1.2. Изучаемые объекты дисциплины

– общие сведения о жидкостях и газах, базовый понятийный аппарат;
– математический аппарат при изучении гидрогазодинамических процессов в элементах реактивных авиационных двигателей и силовых энергоустановок;
– базовые законы сохранения при движении сплошных несжимаемых и сжимаемых сред;
– физические и математические модели течений невязких и вязких течений несжимаемых и сжимаемых сред.

1.3. Входные требования

Не предусмотрены

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-1.2	ИД-1ПК-1.2	Знает: – основные законы сохранения и закономерности, описывающие до- и сверхзвуковые течения с учётом вязкости и сжимаемости; – виды математических моделей; – физические и математические модели невязких и вязких течений несжимаемых и сжимаемых сред.	Знает теоретические основы рабочих процессов в авиационных двигателях и энергетических установках.	Отчёт по практическом у занятию
ПК-1.2	ИД-2ПК-1.2	Умеет: – пользоваться приёмами постановки и решения частных задач механики жидкости и газа с помощью аналитических методов и современных вычислительных пакетов; – выявлять и анализировать физическую сущность процессов и явлений в течениях жидкости и газа; – анализировать результаты решений гидрогазодинамических задач и оценивать методы их решения.	Умеет пользоваться современными вычислительными пакетами для моделирования рабочих процессов в авиационных двигателях и энергетических установках и их агрегатах.	Отчёт по практическом у занятию

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-1.2	ИД-3ПК-1.2	Владеет: – навыками построения физических и математических моделей стационарных и нестационарных течений жидкости и газа в расчётно-теоретических задачах в области авиадвигателестроения, анализа и обобщения результатов моделирования; – навыками решения общих гидрогазодинамических задач с применением современных прикладных программных средств.	Владеет навыками постановки и решения расчётно-теоретических и экспериментальных исследовательских задач; анализа и обобщения результатов моделирования при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при проектировании авиационных двигателей и энергетических установок.	Отчёт по практическом у занятию
ПК-1.3	ИД-1ПК-1.3	Знает: – основные методы и средства измерения локальных и интегральных параметров потоков на разных скоростях течения; – характеристики измерительных устройств и датчиков и способы их теоретического и экспериментального определения.	Знает виды и основы проведения экспериментальных работ и испытаний, методы и средства сбора, регистрации и обработки экспериментальной информации.	Защита лабораторной работы
ПК-1.3	ИД-2ПК-1.3	Умеет: – разрабатывать и описывать схемы препарирования объектов газодинамического экспериментального исследования; – применять методы регистрации и обработки результатов научно-технических экспериментов и испытаний для разработки методик первичной и вторичной обработки результатов измерений.	Умеет использовать современные методы и средства сбора, регистрации и обработки результатов научно-технических экспериментов и испытаний.	Защита лабораторной работы

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-1.3	ИД-3ПК-1.3	Владеет: – навыками планирования и проведения газодинамических экспериментальных исследований; – навыками обработки и анализа результатов экспериментальных исследований.	Владеет навыками планирования и проведения научно-технических экспериментов и испытаний; разработки систем регистрации информации, обработки и анализа результатов экспериментальных исследований.	Защита лабораторной работы
ПК-2.1	ИД-1ПК-2.1	Знает правила постановки, решения и оформления результатов, как основных этапов решения задач о течениях жидкости и газа.	Знает методики и этапность проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов процессов в авиационных двигателях и энергетических установках.	Отчёт по практическом у занятию
ПК-2.1	ИД-2ПК-2.1	Умеет: – формулировать, обосновывать и описывать физические и математические модели течений жидкости и газа; – выполнять гидрогазодинамические расчёты элементов двигателей и газодинамических явлений по моделям несжимаемых и сжимаемых течений.	Умеет проводить газодинамические, тепловые и прочностные расчёты авиационных двигателей и энергетических установок и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования.	Отчёт по практическом у занятию
ПК-2.1	ИД-3ПК-2.1	Владеет: – приёмами и опытом постановки и решения прикладных инженерных задач в области механики жидкости и газа; – навыками анализа и оценки физических и математических моделей, применённых для решений гидрогазодинамических задач, результатов их решения.	Владеет навыками проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов авиационных двигателей и энергетических установок и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования с применением современных программных средств и анализа полученных результатов для принятия технических решений.	Отчёт по практическом у занятию

3. Объем и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах	
		Номер семестра	
		5	6
1. Проведение учебных занятий (включая проведение текущего контроля успеваемости) в форме:	138	54	84
1.1. Контактная аудиторная работа, из них:			
- лекции (Л)	80	32	48
- лабораторные работы (ЛР)	16		16
- практические занятия, семинары и (или) другие виды занятий семинарского типа (ПЗ)	34	18	16
- контроль самостоятельной работы (КСР)	8	4	4
- контрольная работа			
1.2. Самостоятельная работа студентов (СРС)	150	54	96
2. Промежуточная аттестация			
Экзамен	72	36	36
Дифференцированный зачет			
Зачет			
Курсовой проект (КП)			
Курсовая работа (КР)			
Общая трудоемкость дисциплины	360	144	216

4. Содержание дисциплины

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	
5-й семестр				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
Основные понятия, определения, математический аппарат	8	0	4	13
<p>Введение</p> <p>Предмет и прикладное значение курса. Общее и различия механики жидкости и газа, гидродинамики, газодинамики и аэродинамики как частей механики сплошной среды. Виды течений.</p> <p>Гидрогазодинамическая система и ее поведение. Принятые обозначения и определение основных понятий.</p> <p>Обоснование математических моделей. Упрощающие допущения. Виды жидкостей. Обратимость движения. Подходы Эйлера и Лагранжа к решению задач механики жидкости и газа.</p> <p>Тема 1. Основные сведения из математики</p> <p>Векторное поле. Векторная линия, линия тока, вихревая линия.</p> <p>Скалярное и векторное произведение. Операторы Гамильтона и Лапласа. Поток вектора. Исток и сток, диполь. Формула Остроградского-Гаусса. Формула Стокса и её следствия. Градиент скалярной величины. Дивергенция вектора. Ротор вектора и циркуляция вектора, оценка интенсивности вращательного движения, вихрь скорости. Теоремы о градиенте, дивергенции, роторе. Полная производная и её составные части. Правила действия с оператором Гамильтона.</p> <p>Тема 2. Основные понятия термодинамики</p> <p>Рабочее тело. Термодинамические характеристики рабочего тела – давление, температура, плотность. Газовая постоянная, теплоемкость. Энтальпия, 1-й закон термодинамики. Энтропия, 2-й закон термодинамики. Изэнтропический процесс и закон сохранения энтропии. Градиент энтальпии в изэнтропическом процессе. Понятие о полных параметрах. Показатели политропы и адиабаты, как характеристики термодинамического процесса и качественные характеристики сжимаемости среды в этом процессе. Модуль упругости среды, сравнение сжимаемости жидкостей и газов.</p>				
Введение в механику жидкости и газа	8	0	4	13
<p>Тема 3. Основы механики сплошных и разреженных сред</p> <p>Линия тока, трубка тока, струйка тока, поток.</p> <p>Вихревые трубка, шнур и поток. Потенциальное и вихревое течения. Стационарные и нестационарные течения, пространственные, плоские и одномерные течения. Упрощающие предположения механики жидкостей и газов. Расход и плотность тока, средняя скорость.</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>Контрольные поверхность и объем; жидкие частица (моль), объем, кон-тур. Понятие сплошности в аэрогидромеханике, критерий Кнудсена. Сплошные течения, гипотеза Прандтля о налипании и пограничный слой. Течения со скольжением и разреженные течения.</p> <p>Межмолекулярные силы и их влияние на характер течения жидкостей и газов при ускорении. Кавитация и меры борьбы с ней. Общее и различия в течениях жидкости и газа.</p> <p>Силы, действующие в жидкости. Гидростатическое давление и его свойства. Внутреннее трение и вязкость в жидкостях и газах. Зависимость вязкости от параметров потока. Молекулярно-кинетическая природа вязкости. Понятие о турбулентной вязкости. Законы переноса. Виды пограничного слоя. Понятие о режимах течения. Напряженное состояние жидкой частицы. Равнодействующая напряжений. Работа сил трения и ускорение от сил трения, диссипация кинетической энергии. Понятие о вихревом эффекте Ранка.</p> <p>Тема 4. Элементы газовой динамики в одномерном течении</p> <p>Механизмы перехода кинетической энергии в потенциальную. Параметры торможения. Скорость сжимаемого и несжимаемого потоков. Характерные скорости – местная скорость звука, критическая скорость звука (потока), максимальная скорость потока. Реальный предел скорости.</p> <p>Эквивалентность скорости и работы расширения–сжатия. Безразмерные скорости. Связь между характерными скоростями. Связь критических и полных параметров состояния, критический перепад давлений для сжимаемых потоков.</p> <p>Газодинамические функции (ГДФ) параметров торможения.</p>				
Законы сохранения в механике жидкости и газа	16	0	10	28
<p>Тема 5. Законы сохранения в механике жидкости и газа</p> <p>Консервативность законов сохранения.</p> <p>Уравнение неразрывности в дифференциальной и интегральной формах. Нестационарное одномерное уравнение неразрывности в полных и в статических параметрах. Примеры проявления нестационарности (гидроудар, помпаж и пр.). Газодинамические функции расхода, газодинамическая форма уравнения неразрывности.</p> <p>Анализ газодинамической формулы расхода.</p> <p>Предельный расход для внутренних течений.</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>Явление записания по расходу и предельные скорости на входе в каналы. Параметр расхода и расходные характеристики.</p> <p>Силы, действующие в жидкости. Уравнения движения в форме Эйлера и Навье – Стокса. Анализ и применение уравнений Эйлера – радиальное равновесие, универсальный закон изменения окружной составляющей скорости.</p> <p>Уравнение движения в форме Громеки–Лемба и интеграл Коши–Лагранжа. Интеграл Бернулли, условия постоянства полной механической энергии. Анализ уравнения Бернулли для различных термодинамических процессов. Пьезометрические, геометрические, гидростатические, скоростные напоры (высоты).</p> <p>Энергетическая форма Крокко. Условия постоянства полной энтальпии.</p> <p>Уравнение количеств движения (1-е уравнение Эйлера). Полный импульс, ГДФ полного импульса. Сила взаимодействия потока с каналом переменного сечения. Нестационарное уравнение количеств движения в параметрах торможения. Уравнение количеств движения для одномерного движения и элементар-ной струйки. Реактивная сила.</p> <p>Изменение полного давления в потоках. Условия постоянства параметров торможения. Коэффициенты полезного действия в процессах сжатия-расширения. Влияние на коэффициенты полезного действия степени повышения/понижения давления в процессах сжатия/ускорения (торможения/ускорения потоков).</p> <p>Уравнение моментов количеств движения (2-е уравнение Эйлера). Крутящий момент, мощность и работа одной ступени лопаточной машины; связь работы с силами, действующими на лопатки.</p> <p>Энергетическая форма уравнения моментов количества движения, коэффициенты нагрузки (закрутки, напора), напорность ступени. Понятие о принципе работы турбомашин.</p> <p>Нестационарное уравнение энергии в общем виде. Общая форма одномерного стационарного уравнения энергии в тепловой и механической форме (обобщенное уравнение Бернулли).</p> <p>Уравнение энергии для идеального и реального энергоизолированного течения, политропический интеграл, характеристики потерь и их взаимосвязь. Особенности гидродинамической трактовки коэффициента потерь кинетической энергии. Политропический интеграл в процессах сжатия-</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
расширения, изображение этих процессов в T-S и p-v координатах. Коэффициент теплового сопротивления, коэффициент возврата тепла. Изэнтропный и адиабатный потоки. Формулы работ сжатия и расширения в лопаточных машинах, адиабатный и политропный КПД. T-S диаграммы процессов подвода работы к потоку и совершения механической работы потоком. Газодинамическая форма математической модели элементарной струйки в стационарных и нестационарных течениях. Связь сжимаемости со скоростью потока, вывод и анализ. Обобщающее уравнение обращения воздействий. Общие условия изменения скорости сжимаемого потока. Особенности ускорения и торможения сверхзвуковых газовых потоков, понятие о характеристиках, волнах разрежения и скачках уплотнения.				
ИТОГО по 5-му семестру	32	0	18	54
6-й семестр				
Гидростатика и кинематика движения жидкой частицы	10	0	6	18
Тема 6. Уравнение Эйлера в аэрогидростатике Основные понятия – абсолютное и относительное равновесие, поверхность уровня, свободная поверхность, общее условие равновесия. Уравнение движения Эйлера как основное дифференциальное уравнение гидростатики. Условия существования равновесия. Характер массовых сил в основном уравнении гидростатики. Закон Паскаля. Давление жидкости на стенки. Равновесие жидкости при наличии негравитационных массовых сил. Закон Архимеда, плавание тел. Равновесие газов, международная стандартная атмосфера. Тема 7. Общая теория потенциального и вихревого движения Движение жидкой частицы. Потенциальное и вихревое движение, потенциал скорости и функция тока. Физический смысл и ортогональность изолиний потенциала скорости и функции тока. Простейшие виды потенциальных течений, метод суперпозиций. Интенсивность вихревого движения, условия завихренности, циркуляция скорости. Связь циркуляции с интенсивностью вихря, теорема Стокса. Теорема Гельмгольца, формы вихрей. Условия изменения интенсивности вихря, теорема Томпсона.				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>Проявления действия основных теорем кинематики жидкой частицы и нарушения их условий (свободные тороидальные вихри; тороидальные вихри, порожденные осевыми вихрями; разгонные вихри; вихревые следы, разрывы и пр.)</p> <p>Тема 8. Потенциальный вихрь</p> <p>Структура потенциального вихря. Возможные причины и механизм развития потенциального вихря в природе. Радиальное распределение параметров потока при условии радиального равновесия в потенциальной циркуляционной зоне потенциального вихря. Распределение параметров потока по радиусу центрального вихревого ядра потенциального вихря при радиальном равновесии. Использование свойств потенциального вихря для построения профилей лопаточных машин.</p>				
Течения вязких сред	10	8	4	32
<p>Тема 9. Теория пограничного слоя и режимы течения</p> <p>Основные типы пограничных слоев. Физическая и условные толщины пограничного слоя. Характер и режимы течения вязкой жидкости. Потеря устойчивости ламинарного течения, переход ламинарного режима в турбулентный.</p> <p>Пульсационное и осредненное движение. Дополнительные (кажущиеся) турбулентные напряжения и их физический смысл.</p> <p>Аэродинамический шум. Полуэмпирическая теория пути перемешивания. Основные расчетные уравнения пограничного слоя. Управление степенью турбулентности в потоках.</p> <p>Отрыв пограничного слоя. Устойчивость пограничного слоя к отрыву, управление пограничным слоем. Перетекания в пограничном слое, индуктивный вихрь на крыле конечного размаха и парный вихрь в решетках профилей лопаточных машин. Вырождение турбулентности и локализация отрывов в конфузторных течениях.</p> <p>Тема 10. Внутренние течения</p> <p>Сопротивление тел при ламинарном и турбулентном режимах течения. Законы сопротивления для гладких труб при ламинарном и турбулентном режимах.</p> <p>Применение уравнения Бернулли к анализу течений в трубах, коэффициент Кориолиса. Разгонный участок и изменение коэффициента Кориолиса</p> <p>Геометрическая, пьезометрическая и гидростатическая высоты (напоры). Расчет трубопроводов.</p> <p>Расчет коэффициента Дарси для ламинарного</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>режима, турбулентного режима с различной степенью проявления шероховатости (неравенства Сабанеева).</p> <p>Гидросопротивления, потери на трение и местные сопротивления, формулы Вейсбаха и Вейсбаха-Дарси.</p> <p>Основные виды местных сопротивлений – конфузور и внезапное сжатие, диффузор и внезапное расширение.</p> <p>Истечение через отверстия. Изменение энергии в канале постоянного сечения (трубе) для капельных и сжимаемых жидкостей. Потери при повороте потока, вторичные течения. Суммирование и взаимовлияние потерь. Характеристика сети.</p> <p>Уравнение обращения воздействия трения.</p> <p>Газодинамический расчет течения с трением, ГДФ трения. Запирание труб по расходу.</p>				
Сверхзвуковые течения газа	12	0	2	11
<p>Тема 11. Общие сведения о распространении возмущений</p> <p>Распространение слабых возмущений в потоках. Свойства и виды характеристик. Формы характеристик. Общие сведения о влиянии разрывов на поведение потока. Механизм отклонения потока и изменения скорости при пересечении линий слабых возмущений и скачков уплотнения.</p> <p>Тема 12. Теория скачков уплотнения</p> <p>Образование скачков уплотнения, переход скачков уплотнения в слабое возмущение. Относительность понятий точечного и конечного источников возмущений. Преобразование волн сжатия в скачки, примеры (включая пограничный слой и скачки на отрывном следе за телами). Классификация скачков уплотнения.</p> <p>Законы сохранения для скачков уплотнения и ударных волн.</p> <p>Кинематическое и динамическое соотношения для прямых и косых скачков уплотнения, их вывод.</p> <p>Причины деления скачков уплотнения на сильные и слабые. Анализ динамического соотношения.</p> <p>Ударная адиабата и потери в скачках уплотнения.</p> <p>Волны сжатия.</p> <p>Отклонение потока в косых скачках уплотнения.</p> <p>Переход слабых скачков в сильные. Предельный угол поворота.</p> <p>Соотношения Ренкина–Гюгонио. Расчет прямых и косых скачков уплотнения и ударных волн. Системы скачков уплотнения, минимизация потерь.</p> <p>Тема 13. Теория простых волн</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>Простая волна Римана для нестационарного одномерного течения. Простая волна Прандтля–Майера в стационарных сверхзвуковых потоках. Основные параметры течения Прандтля–Майера. Расчет параметров потока в волне разрежения.</p> <p>Расчет угла отклонения потока в волне разрежения.</p> <p>Предельные угол поворота потока и угол раскрытия волны.</p> <p>Тема 14. Взаимодействие и отражение скачков уплотнения и волн</p> <p>Пересечение характеристик и волн разрежения, отражение волн от твердой стенки и границы свободной струи. Взаимодействие волн разрежения и скачков уплотнения.</p> <p>Отсоединенный криволинейный скачок уплотнения при обтекании затупленных тел. Взаимодействие характеристик и скачков уплотнения. Отражение скачков уплотнения от твердой стенки. Предел правильного отражения и пересечения скачков уплотнения, Y–образный и мостообразный скачки уплотнения. Отражение от границы свободной струи. Взаимодействие скачков уплотнения с ламинарным и турбулентным пограничными слоями.</p>				
Частные случаи уравнения обращения воздействий	6	2	0	9
<p>Тема 15. Механическое и тепловое воздействия</p> <p>Механическое воздействие. Уравнение обращения механического воздействия и его анализ. Формы проточной части компрессора и турбины (компенсация механического воздействия геометрическим). Факторы, влияющие на степень изменения полного давления и работу лопаточных машин. Механическая работа и ее кинетический эквивалент, этапы взаимопреобразования энергии газа или жидкости и механической работы в лопаточных машинах.</p> <p>Тепловое воздействие. Уравнение обращения для теплового воздействия и его анализ. Природа и расчет теплового сопротивления в потоках. Тепловой кризис. Влияние теплового кризиса на регулирование и устойчивость работы ВРД. Особенности включения и выключения форсажной камеры сгорания.</p> <p>Тема 16. Расходное воздействие и турбулентные струи</p> <p>Расходное воздействие. Уравнение обращения расходного воздействия и его анализ. Расходное сопло.</p> <p>Турбулентные струи и задачи теории струй. Общие свойства, структура и расчет турбулентных струй.</p> <p>Изменение параметров потока по сечению</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
турбулентных струй, взаимодействие с внешней средой. Изменение параметров по длине турбулентной струи. Рабочий процесс эжектора. Потери смешения потоков. Эжекторный увеличитель тяги.				
Течения в диффузорах, соплах и лопаточных решетках	10	6	4	26
Тема 17. Течения в диффузорах Дозвуковые входные устройства ВРД, течение в диффузорах. Организа-ция скачков уплотнения и регулирование сверхзвуковых входных устройств (СВУ). Помпаж и зуд СВУ. Характеристики СВУ. Тема 18. Течения в соплах Уравнение обращения геометрического воздействия и его анализ. Связь ГДФ "пи"(...) и степени понижения полного давления в соплах "пи"с*, критический и располагаемый перепады давлений. Истечение из дозвуковых сопел и сверхзвуковых сопел на режимах полного расширения и недорасширения. Истечение из сверхзвуковых сопел на режимах перерасширения. Диаграмма режимов истечения. Сопла с косым срезом, девиация реактивной тяги. Характеристики и расчет сопел. Профилирование дозвуковой и сверхзвуковой частей сопла Лавая. Учет вязкости при профилировании сопел. Тема 19. Основы аэродинамики профилей и решеток профилей Теория крылового профиля и решетки профилей: потенциальное циркуляционное течение на аэродинамическом профиле, метод суперпозиций, подъемная сила, теорема Жуковского. Образование разгонного вихря, спутный след. Истечение из косо го среза межлопаточного канала, кромочный след с возвратным течением, локальный отрыв пограничного слоя, отставание потока. Работа косо го среза конфузорных решеток, предел расширительной способности косо го среза. Характеристики потерь при обтекании профилей и решеток профилей. Поляра крыла. Расчет силового взаимодействия решетки профилей с потоком. Основные виды потерь в решетках профилей. Атакоустойчивость решеток. Влияние чисел М и Re на потери в конфузорных и диффузорных решетках. Влияние параметров турбулентности на аэродинамические характеристики решеток.				
ИТОГО по 6-му семестру	48	16	16	96
ИТОГО по дисциплине	80	16	34	150

Тематика примерных практических занятий

№ п.п.	Наименование темы практического (семинарского) занятия
1	Анализ ускорений в течении чистого сдвига. Анализ адекватности, достоверности и области применимости общего решения.
1	Анализ ускорений в течении чистого сдвига. Проверка гипотез при разработке физической и математической модели.
1	Анализ ускорений в течении чистого сдвига. Аналитическое решение по поиску общих формул составляющих полного ускорения.
1	Анализ ускорений 2 течения чистого сдвига. Поиск критериев для нахождения границ области применимости общего решения.
2	Параметры торможения, аэродинамическая сила на плоской пластине и ее анализ.
2	Параметры торможения, аэродинамическая сила на плоской пластине и ее анализ. Решение и анализ решения задачи.
3	Анализ политропического интеграла и полных работ при ускорении/торможении потоков (2 занятия).
4	Анализ КПД процессов ускорения (расширения) и торможения (сжатия) газовых потоков.
5	Равновесие воды в открытом баке при постоянном горизонтальном ускорении.
6	Равновесие воды в открытом баке при движении с постоянной скоростью на повороте с малым и большим радиусом.
6	Анализ решения для большого радиуса поворота применительно к малому радиусу поворота.
7	Расчёт потока, вращающегося по закону постоянной циркуляции: периферийная присоединённая часть.
8	Расчёт потока, вращающегося по закону твёрдого тела: расчёт вращения в ядре потока.
9	Расходная характеристика идеального сопла: при изменении внешнего давления и при изменении полного давления перед соплом.
10	Термогазодинамика процесса идеального и реального истечения из дозвукового сопла.
11	Расчет сил, действующих на идеальное и реальное дозвуковое сопло.

Тематика примерных лабораторных работ

№ п.п.	Наименование темы лабораторной работы
1	Статические и полные параметры состояния и их измерение.
2	Скорость сжимаемого и несжимаемого потоков и её измерение.
3	Расход в уравнении неразрывности и его измерение в потоках с равномерным (квазиравномерным) распределением параметров по сечению.
4	Исследование течения рабочего тела на срезе конического сопла.
5	Измерение и осреднение параметров состояния, скорости и расхода в потоках с неравномерным распределением параметров по сечению.
6	Исследование распределения статического давления, коэффициента давления и скоростей потока по обводам обтекаемого тела.

№ п.п.	Наименование темы лабораторной работы
7	Исследование воздействия трения на дозвуковой поток.
8	Исследование структуры дозвуковой турбулентной струи.

5. Организационно-педагогические условия

5.1. Образовательные технологии, используемые для формирования компетенций

Проведение лекционных занятий по дисциплине основывается на активном методе обучения, при котором учащиеся не пассивные слушатели, а активные участники занятия, отвечающие на вопросы преподавателя. Вопросы преподавателя нацелены на активизацию процессов усвоения материала, а также на развитие логического мышления. Преподаватель заранее намечает список вопросов, стимулирующих ассоциативное мышление и установление связей с ранее освоенным материалом. Допустимо предварительное знакомство студентов с материалом лекций по выложенным в сеть Интернет макетам лекционных занятий, сопровождаемым файлами аудиозаписей комментариев к данным макетам. В данном случае на занятиях возможны расширенный анализ совместно со студентами данного материала и дополнительные комментарии преподавателя.

Практические занятия проводятся на основе реализации метода обучения действием: определяются проблемные области, формируются группы. При проведении практических занятий преследуются следующие цели: применение знаний отдельных дисциплин и креативных методов для решения проблем и принятия решений; отработка у обучающихся навыков командной работы, межличностных коммуникаций и развитие лидерских качеств; закрепление основ теоретических знаний. Задачами в аудиторное время являются: в режиме интерактивного обсуждения с преподавателем и между собой у студентов формируется базовое представление о физической и математической моделях теоретически исследуемого объекта или процесса, создаётся основа методики расчёта. Завершение решения задачи и оформление отчёта осуществляется в часы самостоятельной работы.

Проведение лабораторных занятий основывается на интерактивном методе обучения, при котором обучающиеся взаимодействуют не только с преподавателем, но и друг с другом. При этом доминирует активность учащихся в процессе обучения. Место преподавателя в интерактивных занятиях сводится к направлению деятельности обучающихся на достижение целей занятия.

При проведении учебных занятий используются интерактивные лекции, групповые дискуссии, ролевые игры, тренинги и анализ ситуаций и имитационных моделей.

5.2. Методические указания для обучающихся по изучению дисциплины

При изучении дисциплины обучающимся целесообразно выполнять следующие рекомендации:

1. Изучение учебной дисциплины должно вестись систематически.
2. После изучения какого-либо раздела по учебнику или конспектным материалам рекомендуется по памяти воспроизвести основные термины, определения, понятия раздела.
3. Особое внимание следует уделить выполнению отчетов по практическим занятиям, лабораторным работам и индивидуальным комплексным заданиям на самостоятельную работу.
4. Вся тематика вопросов, изучаемых самостоятельно, задается на лекциях преподавателем. Им же даются источники (в первую очередь вновь изданные в периодической научной литературе) для более детального понимания вопросов, озвученных на лекции.

6. Перечень учебно-методического и информационного обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

6.1. Печатная учебно-методическая литература

№ п/п	Библиографическое описание (автор, заглавие, вид издания, место, издательство, год издания, количество страниц)	Количество экземпляров в библиотеке
1. Основная литература		
1	Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) : учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. СПб : СПбГПУ, 2007. 544 с.	9
2	Матюнин В. П. Механика жидкости и газа. Введение в гидрогазодинамику : учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Пермь : Изд-во ПГТУ, 2005. 79 с.	113
2. Дополнительная литература		
2.1. Учебные и научные издания		
1	Аэрогидромеханика : учебник для вузов / А. М. Мхитарян [и др.] ; Под ред. А. М. Мхитаряна .– Москва : Машиностроение, 1984 .– 352 с. : ил. – (Для вузов)	11
2	Механика жидкости и газа : учебник для вузов / Л. Г. Лойцянский .– 7-е изд., испр .– М. : Дрофа, 2003 .– 840 с. : ил .	116
3	Прикладная газовая динамика : [учебное пособие для втузов] : в 2 ч. / Г. Н. Абрамович .– 5-е изд., перераб. и доп .– М. : Наука : Физматлит, Ч. 1 .– 1991 .– 600 с. : ил.	42
4	Прикладная газовая динамика : [учебное пособие для втузов] : в 2 ч. / Г. Н. Абрамович .– 5-е изд., перераб. и доп .– М. : Наука : Физматлит, Ч. 2 .– 1991 .– 301 с. : ил.	39
5	Прикладная газовая динамика : учебник для втузов / Г. Н. Абрамович .– 3-е изд., перераб. и доп.– Москва : Наука : Физматлит, 1969 .– 824 с.: ил.	19
6	Прикладная газовая динамика : учебник для втузов / Г. Н. Абрамович .– 4-е изд., перераб .– Москва : Наука : Физматлит, 1976 .– 888 с. : ил.	28
7	Прикладная газовая динамика : учебное пособие для вузов / Б. С. Виноградов ; Университет дружбы народов им. П. Лумумбы, Кафедра тепловых двигателей. – Москва : Изд-во УДН, 1965 .– 348 с. : ил.	8
8	Прикладная гидрогазодинамика : учебник для вузов / О. С. Сергель .— Москва : Машиностроение, 1981 .— 374 с. : ил.	62
9	Техническая газодинамика / М. Е. Дейч .– 3-е изд., перераб .– М. : Энергия, 1974 .– 592 с. : ил.	3
2.2. Периодические издания		
1	Известия Российской Академии наук .– Москва ; Ленинград : Наука, 1836 - . Механика жидкости и газа : журнал .– В вузах: ПНИПУ 1996-1997, 2001-2017, ПГНИУ 1966-2009, 2013-2014, ПГПУ 1966-1992 .– Издается с 1966 г. – Издание выходит вместо "Инженерного журнала"(1961-1965) и "Известия АН СССР. Механика" .– Изд. с 1966 по 1991 гг. см. под загл.: Известия АН СССР. Механика жидкости и газа .– Выходит 6 раз в год.	1
2.3. Нормативно-технические издания		
	Не используется	

3. Методические указания для студентов по освоению дисциплины		
	Не используется	
4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента		
	Не используется	

6.2. Электронная учебно-методическая литература

Вид литературы	Наименование разработки	Ссылка на информационный ресурс	Доступность (сеть Интернет / локальная сеть; авторизованный / свободный доступ)
Дополнительная литература	Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника	http://vestnik.pstu.ru/aero/about/inf/	локальная сеть; свободный доступ

6.3. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, используемое при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Вид ПО	Наименование ПО
Операционные системы	Windows 10 (подп. Azure Dev Tools for Teaching)
Офисные приложения.	Microsoft Office Professional 2007. лиц. 42661567

6.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Наименование	Ссылка на информационный ресурс
Научная библиотека Пермского национального исследовательского политехнического университета	http://lib.pstu.ru/
Электронно-библиотечная система Лань	https://e.lanbook.com/
Электронно-библиотечная система IPRbooks	http://www.iprbookshop.ru/
Информационные ресурсы Сети КонсультантПлюс	http://www.consultant.ru/

7. Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине

Вид занятий	Наименование необходимого основного оборудования и технических средств обучения	Количество единиц
Лабораторная работа	Аэродинамическая труба НТБ-16 с набором аэродинамических тел	1
Лабораторная работа	Установка исследования обтекания крылового профиля	1
Лекция	Учебная аудитория с партами и доской, проектор с экраном	1

Вид занятий	Наименование необходимого основного оборудования и технических средств обучения	Количество единиц
Практическое занятие	Учебная аудитория с партами и доской	1

8. Фонд оценочных средств дисциплины

Описан в отдельном документе

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»**

УТВЕРЖДЕНО

на заседании кафедры АД
протокол № «__» _____ 202_г.

Заведующий кафедрой
«Авиационные двигатели»
_____ А.А. Иноземцев

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

«Механика жидкости и газа»

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Приложение к рабочей программе дисциплины

Специальность:	24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей»
Специализация программы специалитета:	«Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок»
Квалификация выпускника:	инженер
Выпускающая кафедра:	«Авиационные двигатели»
Форма обучения:	очная

Курс: 3 **Семестр(ы):** 5, 6

Трудоёмкость:

Кредитов по рабочему учебному плану:	10 ЗЕ
Часов по рабочему учебному плану:	360 ч

Виды контроля:

Экзамен: - **5, 6** Диф.зачёт: - **нет** Зачёт: -**нет** Курсовой проект: -**нет** Курсовая работа: -**нет**

Пермь, 2021 г.

Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся является частью (приложением) к рабочей программе дисциплины «*Механика жидкости и газа*» и разработан на основании:

положения о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, специалитета и магистратуры в ПНИПУ, утвержденного «29» апреля 2014 г.;

приказа ПНИПУ от 03.12.2015 № 3363-В «О введении структуры ФОС»;
рабочей программы дисциплины «дисциплины «*Механика жидкости и газа*», утвержденной «21» сентября 2017 г.

1. Перечень формируемых частей компетенций, этапы их формирования и контролируемые результаты обучения

1.1. Формируемые части компетенций

Согласно КМВ ОПОП учебная дисциплина Б1.В.01 «Механика жидкости и газа» участвует в формировании 3 компетенций: ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-2.1. В рамках учебного плана образовательной программы в 5-м и 6-м семестрах на этапе освоения данной учебной дисциплины формируются следующие дисциплинарные части компетенций:

1. ПК-1.2.Б1.В.01 – способен применять законы, математические знания и средства к исследованию процессов течения жидкости и газа и решению задач описания и анализа решений гидрогазодинамических процессов с использованием стандартных методов математического анализа и моделирования, современных прикладных программных средств;

2. ПК-1.3..Б1.В.01 – способен планировать, готовить и проводить газодинамические экспериментальные исследования, осуществлять обработку экспериментальных данных и проводить анализ результатов экспериментов;

3. ПК-2.1.Б1.В.01 – способен разрабатывать и применять физические и математические модели для газодинамических расчётов течений и процессов в авиационных двигателях и энергетических установках, их основных элементах.

1.2. Этапы формирования дисциплинарных частей компетенций, объекты оценивания и виды контроля

Согласно РПД освоение учебного материала дисциплины запланировано в течение двух семестров (5-го и 6-го семестра базового учебного плана) и разбито на 4 учебных модуля (по 2 в каждом семестре). В каждом модуле предусмотрены аудиторские лекционные и практические занятия, лабораторные работы, а также самостоятельная работа студентов. В рамках освоения учебного материала дисциплины формируются компоненты дисциплинарных компетенций *знать, уметь, владеть*, указанные в РПД, и которые выступают в качестве контролируемых результатов обучения (табл. 1.1).

Контроль уровня усвоенных знаний, усвоенных умений и приобретённых владений осуществляется в рамках текущего, рубежного и промежуточного контроля при изучении теоретического материала, выполнением контрольных работ, защитой отчётов по практическим заданиям, лабораторным работам и экзаменами. Виды контроля сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Перечень контролируемых результатов обучения по дисциплине

Контролируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУВы)	Вид контроля		
	Текущий и промежуточный	Рубежный	Промежуточная аттестация

	ОПЗ		РКР	ОЛР	Экзамен
Усвоенные знания					
3.1 основные законы сохранения и закономерностей, описывающих до- и сверхзвуковые течения с учётом вязкости и сжимаемости;	ОПЗ 1-11		РКР 1-5		ТВ
3.2 виды математических моделей;					ТВ
3.3 физические и математические модели течений невязких и вязких течений несжимаемых и сжимаемых сред;	ОПЗ 1-11		РКР 1-5		ТВ
3.4 правила постановки, решения и оформления результатов, как основных этапов решения задач о течениях жидкости и газа;	ОПЗ 1-11				
3.5 основные методы и средства измерения локальных и интегральных параметров потоков на разных скоростях течения;				ОЛР 1-8	
3.6 характеристики измерительных устройств и датчиков и способы их теоретического и экспериментального определения.				ОЛР 1-8	
Освоенные умения					
У.1 пользоваться приёмами постановки и решения частных задач механики жидкости и газа с помощью аналитических методов и современных вычислительных пакетов;	ОПЗ 1-11			ОЛР 1-8	
У.2 выявлять и анализировать физическую сущность процессов и явлений в течениях жидкости и газа;	ОПЗ 1-11			ОЛР 1-8	ТВ
У.3 формулировать, обосновывать и описывать физические и математические модели течений жидкости и газа;	ОПЗ 1-11			ОЛР 1-8	ТВ
У.4 выполнять гидрогазодинамические расчёты элементов двигателей и газодинамических явлений по моделям несжимаемых и сжимаемых течений;	ОПЗ 1-11			ОЛР 1-8	
У.5 анализировать результаты решений гидрогазодинамических задач и оценивать методы их решения;	ОПЗ 1-11			ОЛР 1-8	ТВ
У.6 разрабатывать и описывать схемы препарирования объектов газодинамического экспериментального исследования;				ОЛР 1-8	
У.7 применять методы регистрации и обработки результатов научно-технических экспериментов и испытаний для разработки методик первичной и вторичной обработки результатов измерений.				ОЛР 1-8	
Приобретенные владения					
В.1 навыками построения физических и математических моделей стационарных и нестационарных течений жидкости и газа в расчётно-теоретических задачах в области авиадвигателестроения, анализа и обобщения результатов моделирования;	ОПЗ 1-11			ОЛР 1-8	
В.2 применения приёмов и опыта постановки и решения прикладных инженерных задач в обла-	ОПЗ 1-11			ОЛР 1-8	

сти механики жидкости и газа;					
<i>В.3</i> навыками решения общих гидрогазодинамических задач с применением современных прикладных программных средств;	ОПЗ 1-11			ОЛР 1-8	
<i>В.4</i> навыками анализа и оценки физических и математических моделей, применённых для решений гидрогазодинамических задач, результатов их решения;	ОПЗ 1-11			ОЛР 1-8	
<i>В.5</i> навыками планирования и проведения газодинамических экспериментальных исследований;				ОЛР 1-8	
<i>В.6</i> навыками обработки и анализа результатов экспериментальных исследований.				ОЛР 1-8	

Примечание:

ОПЗ – выполнение практических заданий с подготовкой и защитой отчёта (оценка знаний, умений и владений);

РКР – рубежные контрольные работы (контроль знаний по теме);

ОЛР – выполнение лабораторных работ с подготовкой и защитой отчёта (оценка знаний, умений и владений);

ТВ – теоретический вопрос.

2. Виды контроля, типовые контрольные задания и шкалы оценивания результатов обучения

2.1. Текущий и промежуточный контроль

Текущий и промежуточный контроль освоения *знаний, умений, владений* дисциплинарных частей компетенций проводится в указанных ниже формах.

- Контроль выполнения практических заданий и подготовки отчётов по практическим заданиям. Всего предусмотрено 11 (4 в 5 семестре и 7 в 6 семестре) отчётов по практическим заданиям.
- Защита отчётов по практическим заданиям.
- Контроль выполнения лабораторных работ и подготовки отчётов по лабораторным работам.

Результаты по 4-балльной шкале оценивания заносятся в книжку преподавателя и учитываются в виде интегральной оценки при проведении промежуточной аттестации.

2.2. Рубежный контроль

Рубежный контроль освоения *знаниевого компонента*, дисциплинарных частей компетенций проводится по окончании модулей дисциплины согласно графику учебного процесса, приведённого в РПД, в указанных ниже формах.

- Рубежные контрольные работы для анализа усвоения теоретического материала. Всего предусмотрено 5 рубежных контрольных работ (модуль 1, модуль 2, модуль 3 – 2 контрольные работы, модуль 4).

Тематика рубежных контрольных работ:

- контрольная работа 1 (модуль 1): основные понятия и определения, формулы и соотношения математики, термодинамики и механики сплошных сред;
 - контрольная работа 2 (модуль 2): основные законы сохранения, их толкование и применение; газодинамические функции;
 - контрольная работа 3 (модуль 3): гидростатика, потенциальное и вихревое течения, закономерности течения с трением;
 - контрольная работа 4 (модуль 3): сверхзвуковые течения;
 - контрольная работа 5 (модуль 4): закономерности внешних воздействий на поток и течения в элементах газотурбинных двигателей.
- Защита отчётов по лабораторным работам. Всего предусмотрено 8 отчётов по лабораторным работам внутри каждого учебного модуля (тематика лабораторных работ предусматривает межмодульные связи).

Типовые вопросы РКР–1:

1. Объяснить понятие градиента функции и обосновать его свойства. Написать формулу связи поверхностного и объёмного интегралов от скалярной величины и следующее из неё определение градиента.
2. Объяснить понятие дивергенции скорости и обосновать её свойства. Написать теорему и формулу Остроградского – Гаусса и следующее из них определение дивергенции.
3. Объяснить понятие ротора скорости и обосновать его свойства. Написать теорему и формулу Стокса и следующее из них определение ротора скорости.
4. Объяснить понятия полной и частной производных, составные части полной производной по времени.
5. Написать и объяснить первый и второй законы термодинамики.
6. Перечислить основные термодинамические характеристики газов и дать их объяснение.
7. Дать определение и объяснение траекторий, линий и струек тока, поперечного и живого сечений.
8. Описать свойства контрольного объёма и жидкой частицы.

Типовые вопросы РКР–2:

Примечание: в скобках после формулировки задания указано хронометрированное время выполнения знающими материал на оценку «Отлично» (с возможным отклонением до половины минуты в любую сторону).

1. Из одномерного обыкновенного дифференциального теплового уравнения энергии вывести обыкновенное дифференциальное уравнение Бернулли (5 мин 10 с).
2. Изобразить процесс реального энергоизолированного торможения в $i - s$ координатах. Написать интегральное уравнение Бернулли (4 мин 30 с).
3. Изобразить процесс реального энергоизолированного ускорения в $i - s$ координатах. Написать интегральное уравнение Бернулли (4 мин 30 с).

4. Изобразить изоэнтропный процесс подвода/отвода механической работы в $i - s$ координатах. Вывести формулы изоэнтропных работ компрессора и турбины (в полных параметрах) (8 мин 30с).

5. Изобразить реальный адиабатный процесс подвода/отвода механической работы в $i - s$ координатах. Показать составные части работы. Дать понятие об изоэнтропном КПД компрессора и турбины (с указанием образующих его коэффициентов) (5 мин 20с).

6. Вывести формулы расчёта удельной объёмной полной внутренней энергии pe через давление. Написать нестационарные одномерные уравнения сохранения энергии в статических и полных параметрах (7 мин 10с).

Варианты 1 – задания 1 и 5; 2 – задания 2 и 4; 3 – задания 3 и 6 обеспечивают примерно равное время выполнения. Допустимое время выполнения двух заданий – не более 15 минут.

Типовые вопросы РКР–3:

1. Получить из дифференциального уравнения движения Эйлера основное уравнение гидростатики, объяснить его и дать примеры применения.

2. Вывести формулу Беркенса для международной стандартной атмосферы.

3. Объяснить потенциал скорости и функцию тока скорости, их физический смысл.

4. Объяснить структуру (распределение скорости и её проекций, статического давления) потенциального вихря. Описать условия существования и разновидности вихрей.

5. Указать причины возникновения разгонного участка в трубопроводах и влияние на него режима течения (числа Рейнольдса).

6. Объяснить общее и различия в зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса для ламинарного и турбулентного режимов течения.

7. Дать описание и причины того, что одна и та же труба может быть гидравлически гладкой и шероховатой.

8. Охарактеризовать воздействие трения на скорость потока. Объяснить запыление каналов по расходу под воздействием трения.

Типовые вопросы РКР–4:

1. Объяснить распространение слабых возмущений в потоках и дать понятие характеристик в сверхзвуковых потоках. Понятие о звуковом барьере.

2. Волны Прандтля – Майера и их свойства.

3. Описать и объяснить ускорение и поворот потока в волне разрежения.

4. Почему и как волны сжатия складываются в скачок уплотнения?

5. Основные законы сохранения для расчёта скачков уплотнения.

6. Механизм отклонения потока в косом скачке уплотнения и расчёт косого скачка уплотнения. Диаграмма углов поворота потока.

7. Почему при отражении от границы свободной струи тип возмущения в волнах разрежения и сжатия меняется на противоположный.

Типовые вопросы РКР–5:

1. Написать общее итоговое уравнения обращения воздействий относительно изменения скорости. Указать принципы его анализа и дать краткую характеристику основным воздействиям.

2. Провести анализ дифференциального уравнения обращения геометрического воздействия. Представить итог интегрирования данного уравнения и оценить его адекватность с помощью известных графических зависимостей для ГДФ приведённого расхода.

3. Провести анализ дифференциального уравнения обращения расходного воздействия. Представить итог интегрирования данного уравнения и оценить его адекватность с помощью известных графических зависимостей для ГДФ приведённого расхода.

2.2.2. Защита лабораторных работ

Всего запланировано 8 лабораторных работ. Типовые темы лабораторных работ приведены в РПД.

Защита лабораторной работы проводится индивидуально каждым студентом или группой студентов. Типовые шкала и критерии оценки приведены в общей части ФОС программы специалитета.

2.3. Выполнение комплексного индивидуального задания на самостоятельную работу

Комплексное индивидуальное задание на самостоятельную работу рабочей программой дисциплины не предусмотрено.

2.4. Итоговый контроль (промежуточная аттестация обучающихся)

Допуск к промежуточной аттестации осуществляется по результатам текущего и промежуточного, рубежного контроля. Условиями допуска являются успешная защита всех отчётов по практическим занятиям (5 семестр) или практическим занятиям и лабораторным работам (6 семестр) и положительная интегральная оценка по результатам текущего и промежуточного, рубежного контроля в каждом семестре.

Промежуточная аттестация в 5 семестре и в 6 семестре, согласно РПД, проводится в виде экзамена по дисциплине устно по билетам. Билет содержит теоретические вопросы (ТВ) для проверки усвоенных знаний, и – при обсуждении с обучающимся его ответа – части умений, всех заявленных дисциплинарных компетенций. В случае возможной дистанционной формы приёма экзаменов допустимо теоретические вопросы заменить решением задач, что позволяет проверить не только знания обучающегося, но и его умения. Примеры экзаменационных задач даны в приложении А.

Оценка результатов обучения по дисциплине в форме уровня сформированности компонентов знать, уметь, владеть заявленных дисциплинарных ком-

петенций проводится по 4-х балльной шкале оценивания с учётом результатов экзамена и рубежного контроля.

2.4.1. Типовые вопросы и задания для экзаменов

Типовые вопросы для контроля усвоенных знаний:

5 семестр

1. Введение. Предмет и прикладное значение дисциплины. Основные понятия, терминология, модели жидкости.
2. Основные математические понятия. Операторы и операции. Физический смысл дивергенции вектора скорости применительно к контрольному объёму и жидкой частице. Формула Остроградского – Гаусса.
3. Основные математические понятия. Ротор вектора скорости и его физический смысл в вихревом течении, теорема Стокса. Правила действий с оператором Гамильтона.
4. Термодинамические характеристики рабочего тела, параметры состояния в идеальных и реальных газах, молекулярно-кинетическое обоснование. Первый и второй законы термодинамики. Изменение энтропии.
5. Основные понятия механики жидкости и газа: плотность и сплошность среды, основные определения, виды жидкостей, виды течений. Понятие о полных параметрах состояния.
6. Общее и различия в течениях жидкостей и газов, молекулярно-кинетическое обоснование.
7. Кризис течения в капельных жидкостях, запираение каналов по расходу. Меры борьбы с кавитацией.
8. Кризис течения в сжимаемых жидкостях, запираение по расходу (см. также вопрос 21).
9. Вязкость и внутреннее трение в жидкостях и газах. Зависимость вязкости от параметров состояния.
10. Напряжения, действующие в жидкостях. Силы, вызванные вязкостью.
11. Работа, тепло и ускорение, вызванные силами вязкости. Примеры проявления составляющих вязкости, вихревой эффект.
12. Законы переноса. Виды и основные понятия пограничного слоя, условные толщины. Понятие о режимах течения и турбулентной вязкости (см. также задачу №1).
13. Методы исследования течений сплошных сред (подходы Эйлера и Лагранжа, физическое моделирование, численное моделирование).
14. Механизмы перехода кинетической энергии в потенциальную энергию. Параметры торможения. Распределение параметров состояния по обводам обтекаемого тела (с ЛР).
15. Основные гидродинамические понятия, свойства элементарной струйки тока, виды расхода, плотность тока. Причины различия расхода через поперечное и живое сечения канала.
16. Характерные скорости потока, анализ формул. Эквивалентность изменения скорости и работы расширения-сжатия. Безразмерные скорости и связь между характерными скоростями в размерном и безразмерном виде. Критериальность безразмерных скоростей, связь сжимаемости со скоростью потока.
17. Газодинамические функции параметров торможения и их анализ. Критические и полные параметры.
18. Консервативность законов сохранения. Уравнение неразрывности в общем виде (консервативное и неконсервативное). Частные случаи уравнения неразрывности.
19. Нестационарное одномерное уравнение неразрывности в полных и в статических параметрах. Примеры проявления нестационарности (гидроудар, помпаж и пр.).
20. Газодинамическая форма уравнения неразрывности. Газодинамические функции расхода.
21. Анализ формулы расхода. Запираение каналов по расходу (см. также уравнение Гюгонио и вопрос 8). Воздействия, способные вызвать запираение каналов по расходу.

22. Силы, действующие в жидкости. Уравнения движения в форме Эйлера и Навье – Стокса.
23. Частные случаи уравнения Эйлера: радиальное равновесие, универсальный закон изменения окружной составляющей скорости.
24. Уравнение движения в форме Громеки–Лемба и интеграл Коши–Лагранжа. Энергетическая форма Крокко. Условия постоянства полной энтальпии.
25. Интеграл Бернулли, условия постоянства полной механической энергии. Анализ уравнения Бернулли.
26. Уравнение количеств движения (первое уравнение Эйлера) в общем виде. Тензор импульса и его компоненты. Неконсервативная форма для расчета силового взаимодействия потока и обтекаемых тел.
27. Методика применения уравнения первого Эйлера, примеры расчета сил (реактивная тяга, силы в решетке профилей).
28. ГДФ полного импульса, примеры использования ГДФ импульса (сопротивление сопла, кинематическое соотношение в скачках уплотнения, потери полного давления при нагреве движущегося потока газа).
29. Нестационарное и стационарное одномерное уравнение количеств движения. Уравнение количества движения для элементарной струйки.
30. Уравнение моментов количеств движения (второе уравнение Эйлера). Крутящий момент, мощность и работа одной ступени лопаточной машины; (далее только для АД) связь работы с силами, действующими на лопатки.
31. Понятие о принципе работы турбомашин. Энергетическая форма уравнения моментов количества движения, коэффициенты нагрузки (закрутки, напора), нагруженность ступени.
32. Уравнение энергии в общем консервативном виде (без вывода). Одномерное нестационарное уравнение энергии в параметрах торможения, анализ. Общая форма одномерного стационарного уравнения энергии в тепловой и механической форме (обобщенное уравнение Бернулли).
33. Уравнение энергии для идеального и реального энергоизолированного течения, поллитропический интеграл (см. также задачу 5), T-S – диаграммы процессов ускорения/торможения
34. Анализ формулы работы, примеры управления работой расширения/сжатия, КПД процессов расширения/сжатия. Коэффициент теплового сопротивления, коэффициент возврата тепла (см. также задачу 5).
35. Изэнтропный и адиабатный потоки. Работа и КПД турбомашин, T-S диаграммы.
36. Характеристики потерь и их взаимосвязь. Особенности гидродинамической трактовки коэффициента потерь кинетической энергии.
37. Уравнение обращения воздействий. Краткий анализ воздействий, виды дросселирования течений (виды кризиса течения). Необходимость комплексных воздействий на поток в турбомашинах.
38. Уравнение Гюгонио и анализ геометрического воздействия. Связь сжимаемости со скоростью потока, вывод и анализ. Другие уравнения и формулы, подтверждающие или повторяющие анализ уравнения Гюгонио.

6 семестр

39. Кинематика движения жидкой частицы. Виды движения. Вихревое и потенциальное движение, условия незавихренности, потенциал скорости. Основные понятия. Уравнения, описывающие вихревое течение. (Сборный вопрос из отдельных тем курса).
40. Теоремы Стокса, Гельмгольца, Томсона. Проявления действия теорем и нарушения их условий (свободные тороидальные вихри; тороидальные вихри, порожденные осевыми вихрями; разгонные вихри; вихревые следы, разрывы и пр.). Расчет потенциального вихря.

41. Частные случаи уравнения Эйлера: уравнение Эйлера в гидростатике – абсолютное и относительное равновесие, уравнение равновесия и уравнение поверхности уровня, международная стандартная атмосфера (формулы вывести, а не запоминать).
42. Частные случаи уравнения Эйлера: относительное равновесие, решение уравнения Эйлера для равномерно ускоряющегося сосуда, вращающегося сосуда.
43. Частные решения уравнения Навье–Стокса для ламинарного режима: течение Куэтта и его виды.
44. Частные решения уравнения Навье–Стокса для ламинарного режима: течение Пуазейля–Гагена, закон неквадратичного трения и коэффициент гидравлического трения для ламинарного режима течения. Участок гидродинамической стабилизации (начальный или разгонный участок). Коэффициент Кориолиса.
45. Потери энергии в канале постоянного сечения (трубе) для капельных и сжимаемых жидкостей. Основные виды местных сопротивлений – конфузор и внезапное сжатие, диффузор и внезапное расширение.
46. Потери при повороте потока, вторичные течения. Параметры поворота, определяющие величину составляющих потерь при повороте.
47. Переход ламинарного режима течения в турбулентный, структура турбулентного пограничного слоя и закон распределения скоростей по его толщине (см. также задачи 1, 3 и 4 о числе Re , ЛабРаб), отрыв пограничного слоя. Расчет коэффициента Дарси для ламинарного режима, турбулентного режима с различной степенью проявления шероховатости (неравенства Сабанеева). Характеристика сети.
48. Воздействие трения, его анализ и расчет, ГДФ трения.
49. Тепловое воздействие, его анализ и расчет. Тепловой кризис, проявление в основных и форсажных камерах сгорания.
50. Параболические, эллиптические и гиперболические уравнения. Понятие о характеристических линиях и поверхностях. Простые волны Римана, примеры волн Римана. Понятие о волне Прандтля – Майера.
51. Распространение слабых возмущений в упругой среде. Виды и свойства характеристик. Простые двумерные волны и их источники. Механизм пересечения стационарных характеристик.
52. Расчетная схема течения Прандтля–Майера. Расчет скорости, углов отклонения потока и раскрытия волны, радиус–вектора линии тока. Предельные угол поворота потока и угол раскрытия волны.
53. Истечение из косога среза, предел расширительной способности косога среза.
54. Образование скачков уплотнения. Относительность понятий точечного и конечного источников возмущений. Переход скачков уплотнения в слабое возмущение. Преобразование волн сжатия в скачки, примеры (включая ПС и скачки на отрывном следе за телами). Классификация скачков уплотнения.
55. Законы сохранения в теории скачков уплотнения и ударных волн. Природа потерь в нормальных разрывах поля скоростей.
56. Кинематическое соотношение для скачков уплотнения и его анализ. Скорость следа за ударной волной.
57. Динамическое соотношение на поверхностях нормального разрыва. Ударная адиабата Гюгонио. Системы скачков уплотнения, их реализация в сверхзвуковых входных устройствах.
58. Расчет скачков уплотнения.
59. Расчет угла фронта косых скачков уплотнения. Предельный угол поворота и возникновение отсоединенных криволинейных скачков уплотнения.
60. Отражение характеристик разряжения и волн разряжения от твердой стенки и границы свободной струи.
61. Отражение волн сжатия и скачков уплотнения от твердой стенки. Правильное и Маховское отражение от плоской твердой стенки.

62. Отражение волн сжатия и скачков уплотнения от границы свободной струи.
63. Режимы истечения из сопла Лавала (см. также в. 68). Диаграмма режимов истечения. Использование обращенного сопла Лавала на режиме глубокого перерасширения для сверхзвуковых входных устройств.

2.4.2. Шкалы оценивания результатов обучения на экзамене

Оценка результатов обучения по дисциплине в форме уровня сформированности компонентов *знать, уметь, владеть* заявленных дисциплинарных компетенций проводится по 4-х балльной шкале оценивания путем выборочного контроля во время экзамена. Типовые шкала и критерии оценки результатов обучения при сдаче экзамена для компонентов *знать, уметь и владеть* приведены в общей части ФОС программы специалитета.

3. Критерии оценивания уровня сформированности компонентов и дисциплинарных компетенций

3.1. Оценка уровня сформированности компонентов дисциплинарных компетенций

При оценке уровня сформированности дисциплинарных компетенций в рамках выборочного контроля при экзамене считается, что полученная оценка за компонент проверяемой в билете дисциплинарной компетенции обобщается на соответствующий компонент всех дисциплинарных компетенций, формируемых в рамках данной учебной дисциплины.

Типовые критерии и шкалы оценивания уровня сформированности компонентов дисциплинарных компетенций приведены в общей части ФОС программы специалитета.

3.2. Оценка уровня сформированности дисциплинарных компетенций

Общая оценка уровня сформированности всех дисциплинарных компетенций проводится путем агрегирования оценок, полученных студентом за каждый компонент формируемых компетенций, с учётом результатов текущего и промежуточного, рубежного контроля в виде интегральной оценки по 4-х балльной шкале. Все результаты контроля заносятся в оценочный лист и заполняются преподавателем по итогам промежуточной аттестации.

Форма оценочного листа и требования к его заполнению приведены в общей части ФОС программы специалитета.

При формировании итоговой оценки промежуточной аттестации в виде экзамена используются типовые критерии, приведенные в общей части ФОС программы специалитета.

Приложение А
(обязательное)

Содержание экзаменационных задач

Задача №1

При каких условиях поток, имеющий число $M_1 = 0,3$, физически движется быстрее, чем поток с числом $M_2 = 0,6$?

Оценку вести с помощью анализа отношения C_1/C_2 .

Оценить реалистичность условий.

Задача №2

Для идеального потока воздуха, движущегося со скоростью $C = 200$ м/с при полной температуре $T^* = 400$ К и статическом давлении $p = 101325$ Па найти все параметры состояния, местную и критическую скорость звука.

Оценить степень сжимаемости воздуха в потоке.

Задача №3

Объяснить и проиллюстрировать наличие передней и задней критических точек при обтекании потоком любого относительно удобообтекаемого тела.

Задача №4

Перед рабочими лопатками (РЛ) турбины поток вращается по закону постоянной циркуляции $\Gamma = \text{const}$. Удельная работа потока распределена по высоте РЛ равномерно $L(r) = \text{const}$.

Как будет вращаться поток после РЛ?

В проточной части РЛ расположены от втулочного $r_{\text{вт}}$ радиуса до концевой радиуса $r_{\text{к}}$. Известными считать все параметры потока перед РЛ на среднем радиусе $r_{\text{ср}} = \frac{r_{\text{вт}} + r_{\text{к}}}{2}$.

Эскиз лопаточного венца представлен на рисунке Б1,б.

Задача №5

Перед рабочими лопатками (РЛ) компрессора поток вращается по закону постоянной циркуляции $\Gamma = \text{const}$. Удельная работа потока распределена по высоте РЛ равномерно $L(r) = \text{const}$.

Как будет вращаться поток после РЛ?

В проточной части РЛ расположены от втулочного $r_{\text{вт}}$ радиуса до концевой радиуса $r_{\text{к}}$. Известными считать все параметры потока перед РЛ на среднем радиусе $r_{\text{ср}} = \frac{r_{\text{вт}} + r_{\text{к}}}{2}$.

Эскиз лопаточного венца представлен на рисунке Б1,а.

Задача №6

Перед рабочими лопатками (РЛ) компрессора поток вращается по закону твёрдого тела $\varpi = C_{\text{тв}}/r = \text{const}$. Удельная работа потока распределена по высоте РЛ равномерно $L(r) = \text{const}$.

Как будет вращаться поток после РЛ?

В проточной части РЛ расположены от втулочного $r_{\text{вт}}$ радиуса до концевой радиуса $r_{\text{к}}$. Известными считать все параметры потока перед РЛ на среднем радиусе $r_{\text{ср}} = \frac{r_{\text{вт}} + r_{\text{к}}}{2}$.

Эскиз лопаточного венца представлен на рисунке Б.1,а.

Задача №7

Может ли турбина с постоянной площадью F_a поперечного сечения проточной части реализовать удельную работу $L_T = 388$ кДж/кг?

Показатель адиабаты $k = 1,33$; газовая постоянная $R = 287,3$ Дж/(кг·К); температура торможения перед турбиной $T_1^* = 1120$ К; скорость потока перед турбиной $C_1 = 120$ м/с.

Эскиз фрагмента газогенератора представлен на рисунке Б.2.

Задача №8

Может ли турбина с постоянной площадью F_a поперечного сечения проточной части реализовать удельную работу $L_T = 388$ кДж/кг?

Показатель адиабаты $k = 1,31$; газовая постоянная $R = 291$ Дж/(кг·К); температура торможения перед турбиной $T_1^* = 1550$ К; скорость потока перед турбиной $C_1 = 120$ м/с.

Эскиз фрагмента газогенератора представлен на рисунке Б.2.

Задача №9

При какой минимально допустимой входной температуре торможения T_1^* турбина с постоянной площадью F_a поперечного сечения проточной части может реализовать удельную работу $L_T = 200$ кДж/кг?

Показатель адиабаты $k = 1,338$; газовая постоянная $R = 288,1$ Дж/(кг·К); скорость потока перед турбиной $C_1 = 110$ м/с.

Эскиз фрагмента газогенератора представлен на рисунке Б.2.

Задача №10

Во сколько раз изменится и в какую сторону (увеличение или уменьшение) максимально возможный массовый расход газа $G_{\Gamma_{\text{max}}}$ для соплового аппарата (СА), если коэффициент потерь кинетической энергии $\xi_{\text{СА}}$ увеличится в 2 раза: с $\xi_{\text{СА}} = 0,04$ до $\xi_{\text{СА}} = 0,08$? Дополнительно оценить изменение расхода в процентах от его исходной величины при $\xi_{\text{СА}} = 0,04$.

Параметры торможения перед СА и геометрические параметры СА в обоих случаях считать одинаковыми. Показатель адиабаты $k = 1,3$.

Схема истечения из СА представлена на рисунке Б.3.

Задача №11

Для изображённого на рисунке Б.3 соплового аппарата (СА) найти максимально допустимую скорость $\lambda_{0\text{max}}$ на входе в СА.

Показатель адиабаты $k = 1,29$. Коэффициент профильных потерь $\xi_{САпр} = 0,03$, полный коэффициент потерь кинетической энергии (с учётом вторичных потерь) составляет $\xi_{СА} = 0,063$. Предельно допустимую скорость λ_{0max} на входе в СА сравнить для обоих коэффициентов потерь. Оценить влияние вторичных потерь на пропускную способность (предельный расход) СА, приняв за базу пропускную способность при наличии только профильных потерь.

Задача №12

Всасывающая воздух из атмосферы при МСА труба имеет постоянный диаметр $d = 0,01$ м. Воздух всасывается со скоростью $C_1 = 2$ м/с.

На сколько метров и во сколько раз изменится критическая длина трубы, если число Рейнольдса Re_d увеличить в 1,5 раза: с $Re_d = 1200$ до $Re_d = 1800$?

Задача №13

Является ли длина трубы $l = 100$ м допустимой для того, чтобы засасывать воздух из атмосферы при МСА со скоростью $C_1 = 120$ м/с во входном сечении?

Внутренний диаметр трубы $d = 0,01$ м.

Задача №14

Является ли длина трубы $l = 100$ м допустимой для того, чтобы засасывать воздух из атмосферы при МСА со скоростью $C_1 = 180$ м/с во входном сечении?

Внутренний диаметр трубы $d = 0,01$ м.

Какую предельную скорость всасывания может обеспечить указанная труба при указанных условиях?

Задача №15

Газотурбинный двигатель (ГТД) работает в стендовых условиях при МСА на высоте $H = 0$ м. Какую степень повышения полного давления $\pi_k^* = p_k^* / p_{вх}^*$ обеспечивает его компрессор, реализующий с $\eta_k^* = 0,845$ подводимую к нему удельную работу $L_k = 345600$ Дж/кг?

Как (во сколько раз, на сколько процентов, в какую сторону относительно первоначально найденного значения) изменится π_k^* , если ГТД при тех же условиях разместить на высоте $H = 2000$ м? Объяснить физические причины изменений.

Изобарную теплоёмкость и показатель адиабаты принимать как для МСА, и считать постоянными (независимыми от температуры среды).

Задача №16

Найти степень повышения полного давления $\pi_k^* = p_k^* / p_{вх}^*$, которую обеспечивает его компрессор, реализующий с $\eta_k^* = 0,867$ подводимую к нему удельную работу $L_k = 296500$ Дж/кг для разных рабочих сред: чистого водорода, чистого азота, сухого воздуха.

Объяснить физические причины расхождения в результатах.

Показатель адиабаты $k = 1,411$ для водорода, $k = 1,404$ для азота, $k = 1,4$ для сухого воздуха.

Полные параметры перед компрессором соответствуют МСА на высоте $H = 0$ м.

Задача №17

Сколько ступеней может иметь осевой компрессор, реализующий удельную работу $L_k = 364$ кДж/кг? Ступени компрессора являются средненагруженными $\bar{H}_z = 0,32$.

Какое минимальное и максимальное значение ступеней может иметь данный компрессор, если его средненагруженные ступени заменить на, соответственно, высоконагруженные и малонагруженные?

Компрессор работает на частоте вращения $n = 11200$ об/мин, средний диаметр лопаточных венцов изменяется от $D_{cp} = 0,5$ м на входе до $D_{cp} = 0,55$ м на выходе.

Задача №18

Во сколько раз (на сколько процентов, в какую сторону) изменится степень повышения полного давления $\pi_k^* = p_k^* / p_{вх}^*$ компрессора турбореактивного двигателя (ТРД) если после взлёта (стендовый режим при МСА) летательный аппарат будет двигаться на высоте $H = 10000$ м со скоростью $M_H = 0,85$ по прежнему при МСА?

Считать, что и на взлёте, и в полёте компрессор ТРД потребляет одинаковую работу $L_k = 320$ кДж/кг при $\eta_k^* = 0,845$.

Объяснить физические причины изменений π_k^* .

Изобарную теплоёмкость и показатель адиабаты принимать как для МСА, и считать постоянными (независимыми от температуры среды).

Задача №19

Найти расход воздуха через идеальное и реальное дозвуковое реактивное сопло. Располагаемый перепад давлений (отношение полного давления перед соплом к внешнему статическому давлению) $\pi_c^* = p_1^* / p_H = 1,5$.

Коэффициент потерь кинетической энергии для реального сопла составляет величину $\xi_c = 0,03$. Площадь поперечного сечения сопла на его срезе $F_c = F_2 = 0,6$ м². Температура на входе в сопло $T_1^* = 400$ К. Из сопла вытекает воздух в атмосферу при МСА на высоте $H = 0$ м.

Задача №20

Располагаемый перепад давлений (отношение полного давления перед соплом к внешнему статическому давлению) дозвукового реактивного сопла $\pi_c^* = p_1^* / p_H = 1,7$. Из сопла вытекает в атмосферу при МСА на высоте $H = 0$ м нагретый до $T_1^* = 315$ К воздух.

Площадь поперечного сечения сопла на входе $F_1 = 0,85$ м² и на его срезе $F_c = F_2 = 0,6$ м².

Найти внутреннюю силу, действующую на сопло, для двух случаев: идеальное и реальное сопло. Для реального сопла принять коэффициент сохранения полного давления $\sigma_c^* = 0,995$.

Сравнить результаты и дать физическое объяснение различиям.

Задача №21

Сверхзвуковой плоский двухскачковый воздухозаборник регулируется продольным перемещением центрального тела и имеет геометрию (рисунок Б.4): высота расположения обечайки $h_{ВЗ} = 0,5$ м; центральное тело выдвинуто на расчётное расстояние $l_p = 0,7$ м; угол заострения центрального тела $\omega = 15^\circ$.

На какую скорость полёта M_n рассчитан данный воздухозаборник?

На какое расстояние Δl и в какую сторону надо передвинуть центральное тело, чтобы сохранить фокусирование скачков уплотнения на обечайке при увеличении скорости полёта на 10% (до $1,1 M_n$)?

Основы решения проиллюстрировать диаграммой углов $\alpha-\omega$.

Задача №22

Сверхзвуковой плоский двухскачковый воздухозаборник имеет геометрию (рисунок Б.4): высота расположения обечайки $h_{ВЗ} = 0,35$ м; центральное тело выдвинуто на расчётное расстояние $l_p = 0,5$ м; угол заострения центрального тела $\omega = 18^\circ$.

На какую скорость полёта M_n рассчитан данный воздухозаборник?

Какое давление торможения будет действовать перед прямым скачком уплотнения, если полёт совершается на высоте $H = 9520$ м при МСА?

Задача №23

Плоское сопло (рисунок Б.5) должно обеспечивать постоянную девиацию вектора тяги (отклонение вектора скорости истечения λ_c на небольшой угол δ_d). Угол косо́го среза сопла $\theta = 25^\circ$. Высота критического сечения задана и равна $h_{с\text{кр}} = 0,3$ м.

Найти длину s косо́го среза и его вынос Δx такие, при которых отсутствует отражение волны разрежения от боковой (верхней) поверхности косо́го среза.

Чему равны угол девиации, скорость истечения и её осевая составляющая?

Показатель адиабаты газа $k = 1,29$.

Приложение Б
(обязательное)

Схемы к задачам

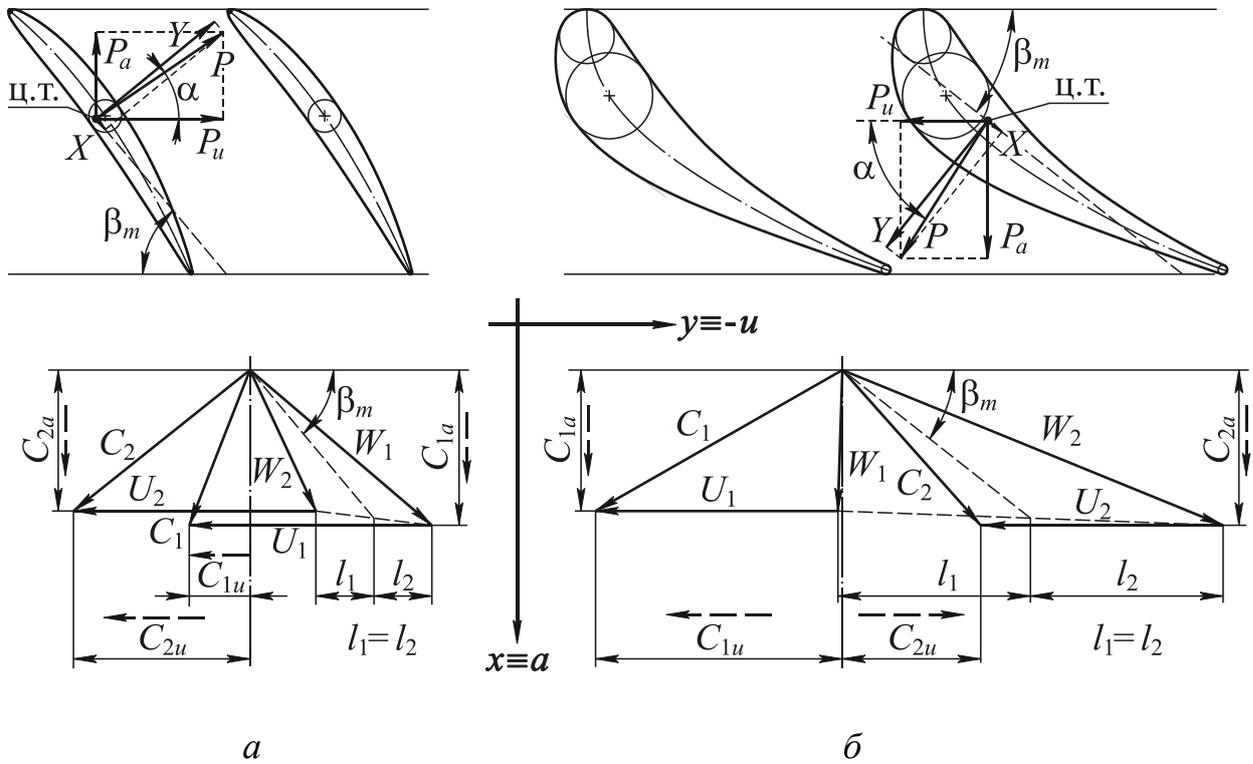


Рисунок А.1 – Схемы рабочих лопаточных венцов и кинематики потока ротора левого вращения к задачам 4, 5, 6:

a – в компрессоре, *б* – в турбине;

β_m – медианный угол скорости W обтекания рабочих лопаток;

знаки проекций скоростей принимать согласно системе координат $x-y$

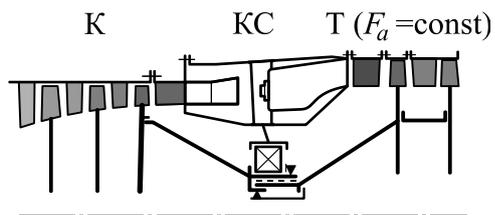


Рисунок А.2 – Турбина с постоянной площадью поперечного сечения

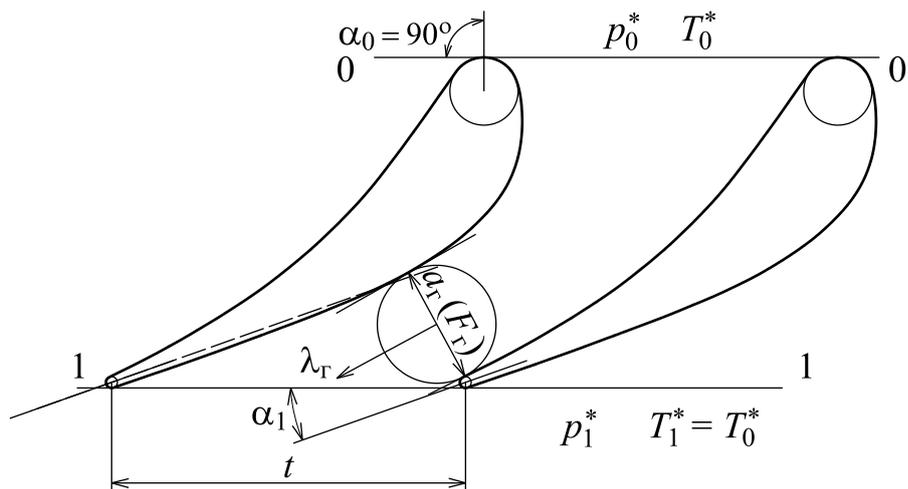


Рисунок А.3 – Схема истечения из соплового аппарата:
(к задачам 10, 11)

$$a_r = t \sin \alpha_1; \quad F_r = a_r h, \quad \text{где } h = \text{const}$$

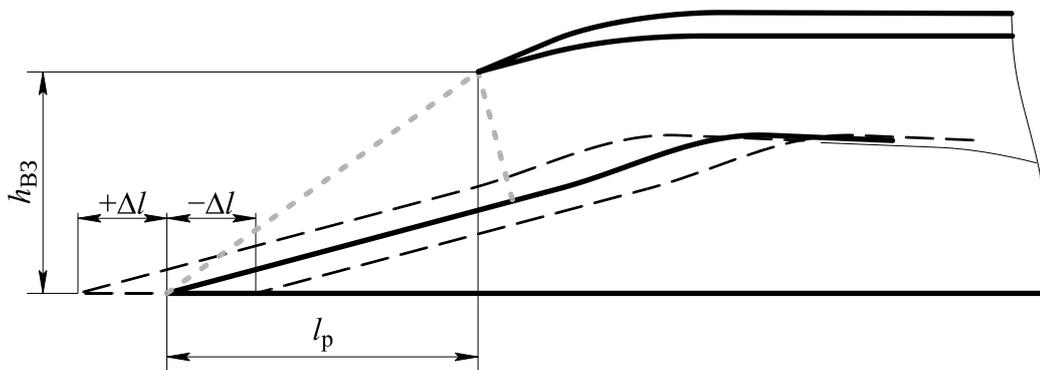


Рисунок А.4 – Схема плоского сверхзвукового воздухозаборника
(к задачам 21, 22)

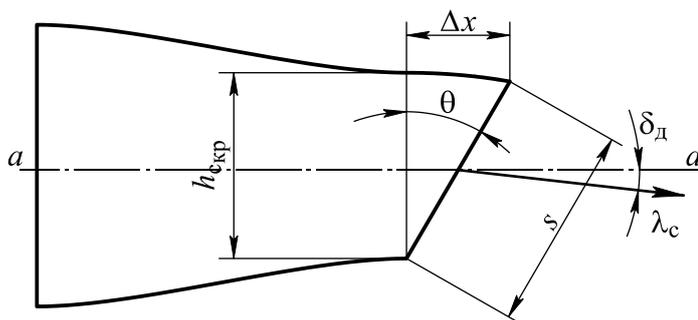


Рисунок А.5 – Схема плоского сверхзвукового сопла
с девиацией вектора тяги (к задаче 23)