

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Набережночелнинский институт (филиал)  
Отделение информационных технологий и энергетических систем



Утверждаю

Первый заместитель директора  
НЧИ КФУ Симонова Л. А.



\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

*подписано электронно-цифровой подписью*

## Программа дисциплины

Аэродинамика воздушных потоков Б1.В.ОД.4

Направление подготовки: 16.03.03 - Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения

Профиль подготовки: Холодильная техника и системы жизнеобеспечения

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2019

**Автор(ы):** Болдырев А.В.

**Рецензент(ы):** Галиакбаров А.Т.

### СОГЛАСОВАНО:

Заведующий(ая) кафедрой: Исрафилов И. Х.

Протокол заседания кафедры No \_\_\_\_ от " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Учебно-методическая комиссия Высшей инженерной школы (Отделение информационных технологий и энергетических систем) (Набережночелнинский институт (филиал)):

Протокол заседания УМК No \_\_\_\_ от " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы
2. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования
3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся
4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий
  - 4.1. Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)
  - 4.2. Содержание дисциплины
5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)
6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)
  - 6.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы и форм контроля их освоения
  - 6.2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания
  - 6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы
  - 6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций
7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)
  - 7.1. Основная литература
  - 7.2. Дополнительная литература
8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)
9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)
10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)
11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)
12. Средства адаптации преподавания дисциплины к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья

Программу дисциплины разработал(а)(и) доцент, к.н. (доцент) Болдырев А.В. (Кафедра высокоэнергетических процессов и агрегатов, Отделение информационных технологий и энергетических систем), AVBoldyrev@kpfu.ru

### 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Выпускник, освоивший дисциплину, должен обладать следующими компетенциями:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ПК-12	способностью применять программные средства компьютерной графики и визуализации результатов деятельности, оформлять отчеты и презентации с помощью современных офисных информационных технологий, текстовых и графических редакторов, средств печати
ПК-3	готовностью выполнять расчетно-экспериментальные работы и решать научно-технические задачи в области холодильной, криогенной техники и систем жизнеобеспечения на основе достижений техники и технологий, классических и технических теорий и методов, теплофизических, математических и компьютерных моделей, обладающих высокой степенью адекватности реальным процессам, машинам и аппаратам

Выпускник, освоивший дисциплину:

Должен знать:

- уравнение неразрывности, уравнение движения, закон количества движения (теорему Эйлера), уравнение количества движения для элементарной струйки, теорему Эйлера о моменте количества движения, теорему Н.Е. Жуковского о подъемной силе, дифференциальное уравнение потенциала скорости для газа, метод Прандтля-Глауэрта, уравнения движения вязкого газа, уравнения пограничного слоя;
- методы упрощений в задачах аэродинамики;
- особенности потенциального и вихревого движений, распространения слабых возмущений в потоке газа, обтекания внешнего тупого угла сверхзвуковым потоком, пересечения и отражения слабых волн, прямых и косых скачков уплотнения, теории косого скачка уплотнения, взаимодействия и отражения скачков уплотнения, пограничного слоя с продольным градиентом давления, отрыва пограничного слоя;
- понятия ударной адиабаты, теории пограничного слоя, условных толщин пограничного слоя, турбулентной струи.

Должен уметь:

- применять газодинамические функции потока импульса;
- линеаризовать дифференциальное уравнение потенциала скорости;
- использовать кинематическое и динамическое соотношения при расчете скачка уплотнения;
- применять законы подобия потоков жидкостей и газов.

Должен владеть:

- навыками расчета параметров плоского потенциального потока несжимаемой жидкости;
- графическими методами расчета сверхзвуковых течений;
- навыками вычисления скорости распространения ударной волны;
- навыками расчета ламинарного пограничного слоя несжимаемой жидкости на плоской стенке;
- навыками расчета турбулентного пограничного слоя.

Должен демонстрировать способность и готовность:

- применять полученные знания на практике.

### 2. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел "Б1.В.ОД.4 Дисциплины (модули)" основной профессиональной образовательной программы 16.03.03 "Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения (Холодильная техника и системы жизнеобеспечения)" и относится к обязательным дисциплинам. Осваивается на 2 курсе в 4 семестре.

### 3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных(ые) единиц(ы) на 108 часа(ов).

Контактная работа - 36 часа(ов), в том числе лекции - 18 часа(ов), практические занятия - 18 часа(ов), лабораторные работы - 0 часа(ов), контроль самостоятельной работы - 0 часа(ов).

Самостоятельная работа - 72 часа(ов).

Контроль (зачёт / экзамен) - 0 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины: зачет в 4 семестре.

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

#### 4.1 Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)

N	Разделы дисциплины / модуля	Семестр	Виды и часы контактной работы, их трудоемкость (в часах)			Самостоятельная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Введение	4	3	3	0	18
2.	Тема 2. Основы теории плоского потока	4	5	5	0	18
3.	Тема 3. Скачки уплотнения	4	5	5	0	18
4.	Тема 4. Движение вязкого газа. Пограничный слой	4	5	5	0	18
	Итого		18	18	0	72

#### 4.2 Содержание дисциплины

##### Тема 1. Введение

Скорость движения жидкой частицы. Уравнение неразрывности. Уравнение движения. Общая постановка задач аэродинамики и методы упрощений. Закон количества движения (теорема Эйлера). Некоторые приложения первой теоремы Эйлера. Уравнение количества движения для элементарной струйки. Газодинамические функции потока импульса. Теорема Эйлера о моменте количества движения.

##### Тема 2. Основы теории плоского потока

Потенциальное и вихревое движение. Плоский потенциальный поток несжимаемой жидкости. Теорема Н.Е. Жуковского о подъемной силе. Дифференциальное уравнение потенциала скорости для газа. Линеаризация дифференциального уравнения потенциала скорости. Метод Прандтля-Глауэрта. Распространение слабых возмущений в потоке газа. Обтекание внешнего тупого угла сверхзвуковым потоком. Графические методы расчета сверхзвуковых течений. Пересечение и отражение слабых волн.

##### Тема 3. Скачки уплотнения

Прямые и косые скачки уплотнения. Кинематическое и динамическое соотношения. Ударная адиабата. Изменение состояния газа. Скорость распространения ударной волны. Теория косого скачка уплотнения. Отклонение потока в косом скачке. Системы скачков уплотнения. Взаимодействие и отражение скачков уплотнения.

##### Тема 4. Движение вязкого газа. Пограничный слой

Уравнения движения вязкого газа. Подобие потоков жидкостей и газов. Основные понятия теории пограничного слоя. Уравнения пограничного слоя. Расчет ламинарного пограничного слоя несжимаемой жидкости на плоской стенке. Условные толщины пограничного слоя. Турбулентный пограничный слой. Пограничный слой с продольным градиентом давления. Отрыв. Взаимодействие со скачками уплотнения. Турбулентные струи.

### 5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

Самостоятельная работа обучающихся выполняется по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Самостоятельная работа подразделяется на самостоятельную работу на аудиторных занятиях и на внеаудиторную самостоятельную работу. Самостоятельная работа обучающихся включает как полностью самостоятельное освоение отдельных тем (разделов) дисциплины, так и проработку тем (разделов), осваиваемых во время аудиторной работы. Во время самостоятельной работы обучающиеся читают и конспектируют учебную, научную и справочную литературу, выполняют задания, направленные на закрепление знаний и отработку умений и навыков, готовятся к текущему и промежуточному контролю по дисциплине.

Организация самостоятельной работы обучающихся регламентируется нормативными документами, учебно-методической литературой и электронными образовательными ресурсами, включая:

Порядок организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры (утвержден приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 5 апреля 2017 года №301).

Письмо Министерства образования Российской Федерации №14-55-996ин/15 от 27 ноября 2002 г. "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений"

Положение от 24 декабря 2015 г. № 0.1.1.67-06/265/15 "О порядке проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Положение № 0.1.1.67-06/241/15 от 14 декабря 2015 г. "О формировании фонда оценочных средств для проведения текущей, промежуточной и итоговой аттестации обучающихся федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Положение № 0.1.1.56-06/54/11 от 26 октября 2011 г. "Об электронных образовательных ресурсах федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Регламент № 0.1.1.67-06/66/16 от 30 марта 2016 г. "Разработки, регистрации, подготовки к использованию в учебном процессе и удаления электронных образовательных ресурсов в системе электронного обучения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Регламент № 0.1.1.67-06/11/16 от 25 января 2016 г. "О балльно-рейтинговой системе оценки знаний обучающихся в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Регламент № 0.1.1.67-06/91/13 от 21 июня 2013 г. "О порядке разработки и выпуска учебных изданий в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

## 6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)

### 6.1 Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы и форм контроля их освоения

Этап	Форма контроля	Оцениваемые компетенции	Темы (разделы) дисциплины
<b>Семестр 4</b>			
	<b>Текущий контроль</b>		
1	Устный опрос	ПК-12, ПК-3	1. Введение 2. Основы теории плоского потока 3. Скачки уплотнения 4. Движение вязкого газа. Пограничный слой
2	Проверка практических навыков	ПК-12, ПК-3	3. Скачки уплотнения 4. Движение вязкого газа. Пограничный слой
3	Контрольная работа	ПК-12, ПК-3	3. Скачки уплотнения 4. Движение вязкого газа. Пограничный слой
	<b>Зачет</b>	ПК-12, ПК-3	

### 6.2 Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

Форма контроля	Критерии оценивания				Этап
	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неуд.	
<b>Семестр 4</b>					
<b>Текущий контроль</b>					

Форма контроля	Критерии оценивания				Этап
	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неуд.	
Устный опрос	В ответе качественно раскрыто содержание темы. Ответ хорошо структурирован. Прекрасно освоен понятийный аппарат. Продemonстрирован высокий уровень понимания материала. Превосходное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения.	Основные вопросы темы раскрыты. Структура ответа в целом адекватна теме. Хорошо освоен понятийный аппарат. Продemonстрирован хороший уровень понимания материала. Хорошее умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения.	Тема частично раскрыта. Ответ слабо структурирован. Понятийный аппарат освоен частично. Понимание отдельных положений из материала по теме. Удовлетворительное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения.	Тема не раскрыта. Понятийный аппарат освоен неудовлетворительно. Понимание материала фрагментарное или отсутствует. Неумение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения.	1
Проверка практических навыков	Продemonстрирован высокий уровень освоения навыков, достаточный для успешного решения задач профессиональной деятельности.	Продemonстрирован хороший уровень освоения навыков, достаточный для решения большей части задач профессиональной деятельности.	Продemonстрирован удовлетворительный уровень освоения навыков, достаточный для решения отдельных задач профессиональной деятельности.	Продemonстрирован неудовлетворительный уровень освоения навыков, недостаточный для решения задач профессиональной деятельности.	2
Контрольная работа	Правильно выполнены все задания. Продemonстрирован высокий уровень владения материалом. Проявлены превосходные способности применять знания и умения к выполнению конкретных заданий.	Правильно выполнена большая часть заданий. Присутствуют незначительные ошибки. Продemonстрирован хороший уровень владения материалом. Проявлены средние способности применять знания и умения к выполнению конкретных заданий.	Задания выполнены более чем наполовину. Присутствуют серьезные ошибки. Продemonстрирован удовлетворительный уровень владения материалом. Проявлены низкие способности применять знания и умения к выполнению конкретных заданий.	Задания выполнены менее чем наполовину. Продemonстрирован неудовлетворительный уровень владения материалом. Проявлены недостаточные способности применять знания и умения к выполнению конкретных заданий.	3
	<b>Зачтено</b>		<b>Не зачтено</b>		
<b>Зачет</b>	Обучающийся обнаружил знание основного учебно-программного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по специальности, справился с выполнением заданий, предусмотренных программой дисциплины.		Обучающийся обнаружил значительные пробелы в знаниях основного учебно-программного материала, допустил принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий и не способен продолжить обучение или приступить по окончании университета к профессиональной деятельности без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.		

### 6.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

#### Семестр 4

#### Текущий контроль

#### 1. Устный опрос

Темы 1, 2, 3, 4

Вопросы по теме 1: теорема Коши-Гельмгольца, скорость перемещения жидкой частицы, поступательное, вращательное и деформационное движения жидкой частицы, вихрь скорости, уравнение неразрывности, живое сечение, поперечное сечение, объемный расход, массовый расход, плотность тока, уравнения Эйлера для идеальной жидкости, уравнения Громеки-Лэмба, интеграл Лагранжа, интеграл Бернулли, установившееся движение, двухмерное движение, одномерное движение, идеальная жидкость, несжимаемая жидкость, баротропная жидкость, количество движения, теорема Эйлера о количестве движения, сила, действующая на стенки диффузора и сопла, реакция вытекающей и втекающей струи, сила тяги воздушно-реактивного двигателя, сила, действующая на стенки криволинейного патрубка, эжектор, полный импульс, уравнение количества движения для элементарной струйки, газодинамические функции потока импульса, момент количества движения, теорема Эйлера о моменте количества движения.

Вопросы по теме 2: потенциальное движение, потенциал скорости, уравнения Лапласа, функция тока, линия тока, эквипотенциальная линия, вихревое движение, вихревые линии, циркуляция скорости, теорема Стокса, следствия из теоремы Стокса, теорема Гельмгольца, теорема Томсона, плоский потенциальный поток несжимаемой жидкости, метод потенциальных полей, плоскопараллельный поток, источник, сток, диполь, потенциальный вихрь, коэффициент давления, парадокс Эйлера-Даламбера, теорема Н.Е. Жуковского о подъемной силе, эффект Магнуса, постулат Жуковского-Чаплыгина, условия Коши-Римана, пусковой (разгонный) вихрь, дифференциальное уравнение потенциала скорости для газа, линеаризация дифференциального уравнения потенциала скорости, метод Прандтля-Глауэрта, распространение слабых возмущений в потоке газа, скорость звука, конус слабых возмущений (конус Маха), обтекание внешнего тупого угла сверхзвуковым потоком, течение Прандтля-Майера, графические методы расчета сверхзвуковых течений - диаграмма эпициклоид и изоэнтропный эллипс, определение изменения скорости по заданному углу поворота потока, определение угла поворота потока по заданному изменению скорости, пересечение слабых волн, отражение слабых волн, линии разрежения, линии сжатия.

Вопросы по теме 3: прямой скачок уплотнения, косой скачок уплотнения, ударная волна, кинематические соотношения для прямого скачка уплотнения, динамические соотношения для прямого скачка уплотнения, ударная адиабата, скорость распространения ударной волны, угол фронта косоугольного скачка уплотнения, угол поворота потока в скачке, температура частичного торможения, отклонение потока в косом скачке уплотнения, ударная поляра, гипоциклоид (строфоид), системы скачков уплотнения, взаимодействие и отражение скачков уплотнения, пересечение двух косых скачков, взаимодействие скачка с волной разрежения, отражение косоугольного скачка от твердой стенки, отражение косоугольного скачка от границы свободной струи.

Вопросы по теме 4: закон жидкостного трения Ньютона, коэффициенты вязкости, закон трения Стокса, уравнения Навье-Стокса, подобие потоков жидкостей и газов, константы подобия, условия подобия, критерии подобия, критерий Ньютона, критерий Струхала, критерий Фруда, критерий Эйлера, критерий Рейнольдса, критерий Маха, критерий Прандтля, теоремы подобия, пограничный слой, толщина пограничного слоя, аэродинамический нагрев, уравнения пограничного слоя (уравнения Прандтля), толщина ламинарного пограничного слоя несжимаемой жидкости на плоской стенке, касательное напряжение на стенке, профиль скорости в ламинарном пограничном слое, коэффициент сопротивления трения, толщина вытеснения (толщина вытесненной массы), толщина потери импульса, толщина потери энергии, турбулентный пограничный слой, профиль скорости в турбулентном пограничном слое, вязкий подслой, универсальный логарифмический закон, закон трения, продольный градиент давления, отрыв пограничного слоя, точка отрыва, сопротивление давления, взаимодействие отрыва со скачками уплотнения, турбулентные струи, свободные струи, затопленные струи, полюс струи.

## 2. Проверка практических навыков

Темы 3, 4

Решение задач по темам:

- Скачки уплотнения;
- Пограничный слой.

Примеры задач:

1. Докажите, что касательная к круговым волнам звуковых возмущений в сверхзвуковом потоке является прямой (такая прямая называется линией или волной Маха).
2. Изменяется ли угол наклона линии Маха  $\mu = \arcsin(1/M)$ , если в потоке газа с постоянными теплоемкостями и одной и той же скоростью увеличивается давление?
3. С какой скоростью распространяется по трубе прямой скачок уплотнения, образующийся при движении поршня со скоростью 250 м/с в газе с температурой 300 К? Показатель адиабаты 1,3, газовая постоянная воздуха 287 Дж/(кг·град)?
4. В сечении турбулентного пограничного слоя, отстающем на расстоянии  $x = 2$  м от носка плоской пластины, обтекаемой воздушным потоком со скоростью  $V = 50$  м/с, измерен профиль продольных скоростей  $V_x(y)$  и вычислена толщина потери импульса 0,003085 м. Определите средний по длине пластины ( $L = x = 2$  м) коэффициент трения  $C_f$ .
5. Пластина с теплоизолированной поверхностью шириной (хордой)  $b = 5$  м и размахом  $L = 1$  м и обтекается сверхзвуковым потоком со скоростью  $V = 4000$  м/с. Условия обтекания соответствуют полету на высоте  $H = 20$  км. Найдите местный и средний коэффициенты трения, распределение толщин ламинарного пограничного слоя, а также силу трения пластины.

## 3. Контрольная работа

Темы 3, 4

1. Летательный аппарат движется на высоте  $H = 10$  км со скоростью  $V = 2000$  км/ч. Какова его скорость относительно частиц воздуха, по которым прошла прямая ударная волна, возникшая перед головной частью корпуса?
2. Сопло Лавала имеет отношение площадей выходного и критического сечений 4. В сопло подается воздух с показателем адиабаты 1,4 из резервуара с давлением 4 МПа. Определите минимальную величину противодавления, при котором в сопле возникает прямой скачок.
3. Найдите отношение скоростей  $V_2/V_1$  за и перед косым скачком уплотнения, присоединенным к заостренному клину с углом 30 град. Отношение плотностей для условий непосредственно за скачком и перед ним 10.
4. Подберите угол клина, при котором за скачком уплотнения, возникающим перед таким клином, число Маха  $M_2 = 1$ . Число Маха набегающего потока  $M_1 = 4$ . Показатель адиабаты 1,4.
5. Рассчитайте параметры воздуха за косым скачком уплотнения для следующих условий: число Маха  $M_1 = 11$ , угол поворота потока за скачком 45 град., высота полета  $H = 5$  км.
6. Параметры газа за косым скачком уплотнения можно рассматривать такими же, как их соответствующие значения за прямым скачком. При каком условии это возможно?
7. Как изменяются температура и скорость в потоке газа за скачком уплотнения по сравнению с изоэнтропным течением при одинаковом изменении давления?
8. Как изменяется критический угол поворота потока за косым скачком уплотнения при увеличении давления?
9. Определите тепловые потоки на ламинарном и турбулентном участках обтекания пластины, находящейся в воздушном потоке, скорость которого  $V = 4000$  м/с. Критическое число Рейнольдса 1000000. Условия обтекания пластины шириной  $b = 5$  м и размахом  $L = 1$  м соответствуют высоте  $H = 10$  км. Температура стенки поддерживается постоянной и равной 300 К.
10. Летательный аппарат в виде конуса движется со скоростью  $V = 3500$  м/с на высоте  $H = 10$  км. Определите тепловой поток к его поверхности при условии, что температура поверхности поддерживается постоянной и равной 600 К. Высота конуса  $h = 5$  м, угол полураствора 40 град.
11. Определите конвективный равновесный удельный тепловой поток в точке полного торможения сферического носка радиусом  $R = 0,25$  м при температуре стенки  $T = 1000$  К в случае полета на высоте  $H = 30$  км со скоростью, соответствующей числу Маха  $M = 15$ . Движение газа за возникающей ударной волной рассматривается потенциальным (безвихревым).
12. Плоская пластина с теплоизолированной поверхностью движется со скоростью  $V = 700$  м/с в воздушной атмосфере на высоте  $H = 10$  км. Определите местные параметры трения на ламинарном участке обтекаемой поверхности (напряжение и коэффициенты трения, толщину пограничного слоя) при условии, что критическое число Рейнольдса 100000. Найдите также средний коэффициент и сопротивление трения для этого участка пластины. Размеры пластины: ширина  $b = 5$  м, размах  $L = 1$  м.
13. Найдите параметры пограничного слоя (местный коэффициент трения; толщину слоя) на участке турбулентного обтекания плоской пластины шириной 5 м, размахом  $L = 1$  м, а также средний коэффициент и силу трения. Условия обтекания пластины потоком со скоростью  $V = 700$  м/с соответствуют высоте  $H = 10$  км. Критическое число Рейнольдса 100000.
14. Объясните, почему при наличии отрицательного градиента давления и интенсивном отводе теплоты от обтекаемой поверхности повышается устойчивость ламинарного пограничного слоя.
15. При каких условиях теплообмен в диссоциирующем газе характеризуется равновесностью или отклонением от нее?
16. Укажите место отрыва пограничного слоя при больших (закритических) углах атаки у прямого, трапециевидного и стреловидного крыльев. Какие меры принимаются для предотвращения отрыва пограничного слоя на концевых участках стреловидного крыла?

### Зачет

Вопросы к зачету:

1. Скорость движения жидкой частицы.
2. Уравнение неразрывности.
3. Уравнение движения.
4. Общая постановка задач аэродинамики и методы упрощений.
5. Закон количества движения (теорема Эйлера).
6. Некоторые приложения первой теоремы Эйлера.
7. Уравнение количества движения для элементарной струйки.
8. Газодинамические функции потока импульса.
9. Теорема Эйлера о моменте количества движения.
10. Потенциальное и вихревое движение.
11. Плоский потенциальный поток несжимаемой жидкости.
12. Теорема Н.Е. Жуковского о подъемной силе.
13. Дифференциальное уравнение потенциала скорости для газа.
14. Линеаризация дифференциального уравнения потенциала скорости. Метод Прандтля-Глауэрта.
15. Распространение слабых возмущений в потоке газа.
16. Обтекание внешнего тупого угла сверхзвуковым потоком.
17. Графические методы расчета сверхзвуковых течений.
18. Пересечение и отражение слабых волн.

19. Прямые и косые скачки уплотнения.
20. Кинематическое и динамическое соотношения.
21. Ударная адиабата. Изменение состояния газа.
22. Скорость распространения ударной волны.
23. Теория косоугольного скачка уплотнения.
24. Отклонение потока в косом скачке.
25. Системы скачков уплотнения.
26. Взаимодействие и отражение скачков уплотнения.
27. Уравнения движения вязкого газа.
28. Подобие потоков жидкостей и газов.
29. Основные понятия теории пограничного слоя.
30. Уравнения пограничного слоя.
31. Расчет ламинарного пограничного слоя несжимаемой жидкости на плоской стенке.
32. Условные толщины пограничного слоя.
33. Турбулентный пограничный слой.
34. Пограничный слой с продольным градиентом давления.
35. Отрыв пограничного слоя. Взаимодействие со скачками уплотнения.
36. Турбулентные струи.

#### 6.4 Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

В КФУ действует балльно-рейтинговая система оценки знаний обучающихся. Суммарно по дисциплине (модулю) можно получить максимум 100 баллов за семестр, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов.

Для зачёта:

56 баллов и более - "зачтено".

55 баллов и менее - "не зачтено".

Для экзамена:

86 баллов и более - "отлично".

71-85 баллов - "хорошо".

56-70 баллов - "удовлетворительно".

55 баллов и менее - "неудовлетворительно".

Форма контроля	Процедура оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций	Этап	Количество баллов
<b>Семестр 4</b>			
<b>Текущий контроль</b>			
Устный опрос	Устный опрос проводится на практических занятиях. Обучающиеся выступают с докладами, сообщениями, дополнениями, участвуют в дискуссии, отвечают на вопросы преподавателя. Оценивается уровень домашней подготовки по теме, способность системно и логично излагать материал, анализировать, формулировать собственную позицию, отвечать на дополнительные вопросы.	1	10
Проверка практических навыков	Практические навыки проверяются путём выполнения обучающимися практических заданий в условиях, полностью или частично приближенных к условиям профессиональной деятельности. Проверяется знание теоретического материала, необходимое для правильного совершения необходимых действий, умение выстроить последовательность действий, практическое владение приёмами и методами решения профессиональных задач.	2	20
Контрольная работа	Контрольная работа проводится в часы аудиторной работы. Обучающиеся получают задания для проверки усвоения пройденного материала. Работа выполняется в письменном виде и сдаётся преподавателю. Оцениваются владение материалом по теме работы, аналитические способности, владение методами, умения и навыки, необходимые для выполнения заданий.	3	20
<b>Зачет</b>	Зачёт нацелен на комплексную проверку освоения дисциплины. Обучающийся получает вопрос (вопросы) либо задание (задания) и время на подготовку. Зачёт проводится в устной, письменной или компьютерной форме. Оценивается владение материалом, его системное освоение, способность применять нужные знания, навыки и умения при анализе проблемных ситуаций и решении практических заданий.		50

## 7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

### 7.1 Основная литература:

1. Моргунов, К.П. Механика жидкости и газа [Электронный ресурс]: Учебное пособие. - 2-е изд., испр. и доп. - СПб. : Издательство 'Лань', 2018. - 208 с.: ил. - ISBN 978-5-8114-3278-3. - Режим доступа: <https://e.lanbook.com/reader/book/109512/#2>
2. Токарева, С.А. Прикладная газовая динамика. Численные методы решения гиперболических систем уравнений [Электронный ресурс]: Учебное пособие. - СПб.: Издательство 'Лань', 2019. - 244 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-3741-2. - Режим доступа: <https://e.lanbook.com/reader/book/118622/#2>
3. Сазанов, И.И. Гидравлика [Электронный ресурс]: учебник / И.И. Сазанов, А.Г. Схиртладзе, В.И. Иванов. - М.: КУРС: ИНФРА-М, 2017. - 320 с. - ISBN 978-5-906818-77-5 (КУРС). - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=601869>

### 7.2. Дополнительная литература:

1. Семенов, В.П. Основы механики жидкости [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.П. Семенов. - М. : ФЛИНТА, 2013. - 375 с. - ISBN 978-5-9765-0870-5. - Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=462982>
2. Башкин, В.А. Численное исследование задач внешней и внутренней аэродинамики [Электронный ресурс] / В.А. Башкин, И.В. Егоров. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. - 332 с. - ISBN 978-5-9221-1524-7. - Режим доступа: <https://e.lanbook.com/reader/book/59694/#2>
3. Елизаров, А.М. Задачи оптимизации формы в аэрогидродинамике [Электронный ресурс] / А.М. Елизаров, А.Р. Касимов, Д.В. Маклаков. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 480 с. - ISBN 978-5-9221-0999-4. - Режим доступа: <https://e.lanbook.com/reader/book/2730/#2>

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

- Консультант Плюс - <http://www.consultant.ru/>  
Научная электронная библиотека - <http://elibrary.ru/>  
ЭБС ZNANIUM.COM - <http://znanium.com/>  
ЭБС Издательства Лань - <http://e.lanbook.com/>  
ЭБС Консультант студента - <http://www.studentlibrary.ru/>  
ЭБС Университетская библиотека online - <http://biblioclub.ru>

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

Вид работ	Методические рекомендации
лекции	В ходе лекционных занятий преподаватель устно, в логически выдержанной форме излагает новый учебный материал, который конспектируется студентами с оставлением (по возможности) полей для заметок и комментариев (дополнений лекционного материала по результатам самостоятельного изучения рекомендуемой литературы). Обучающиеся задают преподавателю уточняющие вопросы с целью уяснения теоретических положений, анализа информации, решения проблемных задач и др. При подготовке к лекционным и иным занятиям может понадобиться материал, изучавшийся на курсах: 'Математика', 'Физика' и др. Поэтому стоит обращаться к соответствующим источникам (учебникам, монографиям, статьям).
практические занятия	Работа на практических занятиях предполагает активное участие в обсуждении теоретических вопросов и решении задач с применением методических материалов и специализированного программного обеспечения. Задачи связаны с определением характеристик прямых и косых скачков уплотнения, параметров ламинарного и турбулентного пограничного слоя и др.
самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов подразумевает как проработку лекционного материала с использованием рекомендуемой учебной литературы, так и освоение материала, вынесенного на самостоятельное изучение, а также выполнение контрольной работы и подготовку к устным опросам, практическим занятиям и зачету.

Вид работ	Методические рекомендации
устный опрос	Для подготовки к устным опросам рекомендуется выделять в материале проблемные вопросы, затрагиваемые преподавателем в лекции, и группировать информацию вокруг них. Желательно выделять в используемой литературе постановки вопросов, на которые разными авторами могут быть даны различные ответы. На основании постановки таких вопросов следует собирать аргументы в пользу различных вариантов решения поставленных задач. В текстах авторов, таким образом, следует выделять следующие компоненты: постановка проблемы; варианты решения; аргументы в пользу тех или иных вариантов решения. На основе выделения этих элементов проще составлять собственную аргументированную позицию по рассматриваемому вопросу.
проверка практических навыков	Преподаватель проверяет правильность решения задач, связанных с определением характеристик прямых и косых скачков уплотнения, параметров ламинарного и турбулентного пограничного слоя и др. При этом обучающимся могут быть заданы дополнительные вопросы с целью уточнения степени освоения практических навыков.
контрольная работа	Выполнение контрольной работы подразумевает самостоятельное решение обучающимися задач, согласно указаниям преподавателя. При этом студентам необходимо опираться как на лекционный материал, так и на справочную, нормативную и иную литературу, а также на решения задач, рассмотренных на учебных занятиях.
зачет	При подготовке к зачету необходимо, прежде всего, опираться на конспекты лекций, а также на источники, которые разбирались на практических занятиях в течение изучения курса. На зачете обучающийся отвечает на один вопрос из приведенного выше списка и на дополнительные вопросы преподавателя, заданные с целью уточнения уровня освоения компетенций.

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

Освоение дисциплины "Аэродинамика воздушных потоков" предполагает использование следующего программного обеспечения и информационно-справочных систем:

Операционная система Microsoft Windows Professional 7 Russian

Пакет офисного программного обеспечения Microsoft Office 2010 Professional Plus Russian

Браузер Mozilla Firefox

Браузер Google Chrome

Adobe Reader XI

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС "ZNANIUM.COM" содержит произведения крупнейших российских учёных, руководителей государственных органов, преподавателей ведущих вузов страны, высококвалифицированных специалистов в различных сферах бизнеса. Фонд библиотеки сформирован с учетом всех изменений образовательных стандартов и включает учебники, учебные пособия, учебно-методические комплексы, монографии, авторефераты, диссертации, энциклопедии, словари и справочники, законодательно-нормативные документы, специальные периодические издания и издания, выпускаемые издательствами вузов. В настоящее время ЭБС ZNANIUM.COM соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "Консультант студента", доступ к которой предоставлен обучающимся. Многопрофильный образовательный ресурс "Консультант студента" является электронной библиотечной системой (ЭБС), предоставляющей доступ через сеть Интернет к учебной литературе и дополнительным материалам, приобретенным на основании прямых договоров с правообладателями. Полностью соответствует требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования к комплектованию библиотек, в том числе электронных, в части формирования фондов основной и дополнительной литературы.

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

Освоение дисциплины "Аэродинамика воздушных потоков" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Мультимедийная аудитория, вместимостью более 60 человек. Мультимедийная аудитория состоит из интегрированных инженерных систем с единой системой управления, оснащенная современными средствами воспроизведения и визуализации любой видео и аудио информации, получения и передачи электронных документов. Типовая комплектация мультимедийной аудитории состоит из: мультимедийного проектора, автоматизированного проекционного экрана, акустической системы, а также интерактивной трибуны преподавателя, включающей тач-скрин монитор с диагональю не менее 22 дюймов, персональный компьютер (с техническими характеристиками не ниже Intel Core i3-2100, DDR3 4096Mb, 500Gb), конференц-микрофон, беспроводной микрофон, блок управления оборудованием, интерфейсы подключения: USB, audio, HDMI. Интерактивная трибуна преподавателя является ключевым элементом управления, объединяющим все устройства в единую систему, и служит полноценным рабочим местом преподавателя. Преподаватель имеет возможность легко управлять всей системой, не отходя от трибуны, что позволяет проводить лекции, практические занятия, презентации, вебинары, конференции и другие виды аудиторной нагрузки обучающихся в удобной и доступной для них форме с применением современных интерактивных средств обучения, в том числе с использованием в процессе обучения всех корпоративных ресурсов. Мультимедийная аудитория также оснащена широкополосным доступом в сеть интернет. Компьютерное оборудование имеет соответствующее лицензионное программное обеспечение.

Компьютерный класс, представляющий собой рабочее место преподавателя и не менее 15 рабочих мест студентов, включающих компьютерный стол, стул, персональный компьютер, лицензионное программное обеспечение. Каждый компьютер имеет широкополосный доступ в сеть Интернет. Все компьютеры подключены к корпоративной компьютерной сети КФУ и находятся в едином домене.

Специализированная лаборатория оснащена оборудованием, необходимым для проведения лабораторных работ, практических занятий и самостоятельной работы по отдельным дисциплинам, а также практик и научно-исследовательской работы обучающихся. Лаборатория рассчитана на одновременную работу обучающихся академической группы либо подгруппы. Занятия проводятся под руководством сотрудника университета, контролирующего выполнение видов учебной работы и соблюдение правил техники безопасности. Качественный и количественный состав оборудования и расходных материалов определяется спецификой образовательных программ.

## **12. Средства адаптации преподавания дисциплины к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья**

При необходимости в образовательном процессе применяются следующие методы и технологии, облегчающие восприятие информации обучающимися инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья:

- создание текстовой версии любого нетекстового контента для его возможного преобразования в альтернативные формы, удобные для различных пользователей;
- создание контента, который можно представить в различных видах без потери данных или структуры, предусмотреть возможность масштабирования текста и изображений без потери качества, предусмотреть доступность управления контентом с клавиатуры;
- создание возможностей для обучающихся воспринимать одну и ту же информацию из разных источников - например, так, чтобы лица с нарушениями слуха получали информацию визуально, с нарушениями зрения - аудиально;
- применение программных средств, обеспечивающих возможность освоения навыков и умений, формируемых дисциплиной, за счёт альтернативных способов, в том числе виртуальных лабораторий и симуляционных технологий;
- применение дистанционных образовательных технологий для передачи информации, организации различных форм интерактивной контактной работы обучающегося с преподавателем, в том числе вебинаров, которые могут быть использованы для проведения виртуальных лекций с возможностью взаимодействия всех участников дистанционного обучения, проведения семинаров, выступления с докладами и защиты выполненных работ, проведения тренингов, организации коллективной работы;
- применение дистанционных образовательных технологий для организации форм текущего и промежуточного контроля;
- увеличение продолжительности сдачи обучающимся инвалидом или лицом с ограниченными возможностями здоровья форм промежуточной аттестации по отношению к установленной продолжительности их сдачи;
- продолжительности сдачи зачёта или экзамена, проводимого в письменной форме, - не более чем на 90 минут;
- продолжительности подготовки обучающегося к ответу на зачёте или экзамене, проводимом в устной форме, - не более чем на 20 минут;
- продолжительности выступления обучающегося при защите курсовой работы - не более чем на 15 минут.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и учебным планом по направлению 16.03.03 "Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения" и профилю подготовки Холодильная техника и системы жизнеобеспечения .